

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2009

Radovan Plšek



VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Katedra elektroenergetiky



DIPLOMOVÁ PRÁCE

IZOLAČNÍ SYSTÉM STEJNOSMĚRNÝCH ELEKTROMOTORŮ

Insulation system of DC motors

2009

Bc. Radovan Plšek

Prohlášení:

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

7.5.2009

.....
Radovan Plšek

Poděkování:

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Václavu Čechovi, Ph.D. za věcné připomínky a vedení při tvorbě této diplomové práce. Dále bych rád poděkoval rodičům a blízkým za podporu ve studiu.

Abstrakt:

Tato diplomová práce se zabývá izolačním systémem stejnosměrných elektromotorů- jeho teoretickým rozбором, praktickým provedením a degradačními činiteli, které na něj působí. Správná volba izolačních materiálů a technologických postupů je důležitá pro následné použití v elektrickém stroji, má vliv na celý izolační systém stroje, tudíž na jeho výkon, zatěžování, ale i na předcházení poruchovosti vlivem nepříznivých vlivů. Cílem diplomové práce byl rozbor a navržení izolačního systému trakčního motoru v tepelné třídě 180 (H) za pomoci soudobých materiálů a technologií. Dále ověření a dokázání náchylnosti a vlivů působících na původní izolační systém stejnosměrného trakčního elektromotoru.

Klíčová slova:

Stejnosměrný stroj, stejnosměrný elektromotor, rotor, stator, komutátor, vinutí, buzení, izolační systém, elektroizolační materiál, meziatomová vazba, polarizace, izolační odpor, elektrická pevnost, teplotní třídy, impregnace, resin-rich, VPI, Elmica®, Samica®, bandáž, drážka, cívka, degradační činitelé, elektrický a tepelný průraz.

Abstract:

The thesis deals with insulating systems of DC (direct-current) electric motors, their theoretical analysis, their type of construction and affecting degrading factors. The right choice of insulating materials and technologic processes is important for their subsequent use in an electric unit and has an influence on the whole insulating system of the unit and subsequently on its performance and load. It also enables to prevent the failures caused by negative effects.

The aim of the thesis was to analyse and design an insulating system of the suspended motor in thermal class of 180 (H) using new materials and technologies. Another task was to confirm and prove error liability and diagnose influences on the original insulating system of the DC suspended electric motor.

Key words:

Direct-current unit, direct-current electric motor, rotor, stator, commutator, winding, excitation, insulating system, electro-insulating material, interatomic bond, polarization, insulating resistance, electric resistance, thermal classes, impregnation, resin-rich, VPI, Elmica®, Samica®, bandage, slot, coil, degrading factors, electric and thermal breakdown.

Seznam použitých symbolů a značek:

$B\delta$	[T]	mag. indukce ve vzduchové mezeře
B,C	[-]	materiálové konstanty
BV	[-]	budící vinutí
C	[F]	kapacita
E	[Vm^{-1}]	intenzita el. pole
F	[N]	síla
F _m	[A]	magnetomotorické napětí
H	[$A.m^{-1}$]	intenzita mag.pole
-H, +H	[-]	označení svorek hlavní pólů
HP	[-]	označení hlavních pólů
I	[A]	elektrický proud
I _a	[A]	kotevní proud
I _b	[A]	budící proud
IS	[-]	izolační stav
+K,-Q	[-]	označení svorek pomocných pólů
M	[Nm]	točivý moment motoru
P	[kW]	jmenovitý výkon motoru
PP	[-]	označení pomocných pólů
\vec{P}	[Cm^{-2}]	vektor polarizace
Q _r	[C]	náboj na elektrodách
R _{iz}	[$M\Omega$]	izolační odpor
U	[V]	elektrické napětí
U _i	[V]	indukované napětí
c	[-]	konstanta motoru
ϵ_r	[-]	relativní permitivita
γ	[Sm^{-1}]	vodivost
κ	[-]	koeficient polarizace
l	[m]	délka vodiče
n	[ot/min]	otáčky
ρ	[Ωm]	měrný elektrický odpor
p _i	[-]	polarizační index
tg δ	[-]	ztrátový činitel
ω	[rad/s]	mechanická úhlová rychlost
Φ	[Wb]	magnetický tok

OBSAH:

1. ÚVOD	1
2. TEORIE STEJNOSMĚRNÝCH STROJŮ.....	2
2.1. HISTORICKÝ VÝVOJ.....	2
2.2. STEJNOSMĚRNÝ STROJ	3
2.2.1 Princip činnosti dynama	3
2.2.2 Princip činnosti motoru	4
2.3. MAGNETICKÝ OBVOD STEJNOSMĚRNÝCH STROJŮ	5
2.4. VINUTÍ.....	6
2.4.1 Jádrové vinutí	6
2.4.2 Rozložené vinutí.....	7
2.5. KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ STEJNOSMĚRNÉHO MOTORU.....	9
2.5.1 Stator stejnosměrného stroje.....	9
2.5.2 Rotor stejnosměrného stroje	11
2.5.3 Sběrné ústrojí.....	12
2.6. PROVEDENÍ BUZENÍ STEJNOSMĚRNÝCH MOTORŮ	13
2.6.1 Zapojení budicího statorového vinutí.....	13
2.7. VÝHODY A NEVÝHODY STEJNOSMĚRNÝCH STROJŮ	15
3. TEORIE IZOLANTŮ	16
3.1 VAZBA ATOMŮ A STRUKTURA LÁTEK	16
3.1.1 Meziatomové vazby	16
3.1.2 Polárnost a nepolárnost látek a skupenství látek	18
3.2 NOSIČE ELEKTRICKÉHO NÁBOJE V IZOLANTU.....	19
3.2.1 Dielektrika a izolanty	19
3.3 POLARIZACE DIELEKTRIKA	19
3.3.1 Pružné polarizace	20
3.3.2 Relaxační polarizace.....	21
3.3.3 Migrační polarizace.....	22
3.3.4 Polarizace bez působení elektrického pole	22
3.3.5 Relativní permitivita	23
3.4 ABSORPČNÍ PROUD, ČINITEL POLARIZACE A STAV IZOLACE	24
3.5 DŮLEŽITÉ CHARAKTERISTICKÉ VLASTNOSTI IZOLANTŮ	26
4. PROVEDENÍ IZOLAČNÍHO SYSTÉMU	29
4.1. TEPLOTNÍ TŘÍDY	29
4.1.1 Rozdělení používaných tuhých izolanů a zařazení do teplotních tříd	30
4.2 TECHNOLOGIE IZOLAČNÍCH SYSTÉMŮ ELEKTRICKÝCH STROJŮ	31
4.2.1 Nízkonapěťové izolační systémy točivých elektrických strojů	31
4.2.2 Vysokonapěťové izolační systémy točivých elektrických strojů	33
4.3 PROVEDENÍ IZOLAČNÍHO SYSTÉMU TRAKČNÍHO MOTORU.....	35
4.3.1 Provedení trakčního motoru v třídě 130 (B).....	36
4.3.2 Provedení izolačního systému trakčního motoru ve třídě 155 (F)	37

4.4	NOVĚ NAVRŽENÝ IZOLAČNÍ SYSTÉM PRO TRAKČNÍ MOTOR	38
4.4.1	Stator trakčního elektromotoru	39
4.4.2	Rotor trakčního elektromotoru.....	40
4.4.3	Přehled a popis elektroizolačních materiálů	44
5.	DEGRADAČNÍ ČINITELÉ.....	47
5.1	TEPLOTNÍ NAMÁHÁNÍ	48
5.1.1	Tepelné stárnutí.....	48
5.2	ELEKTRICKÉ NAMÁHÁNÍ	50
5.2.1	Elektrochemický průraz	50
5.2.2	Tepelný průraz	51
5.2.3	Čistě elektrický průraz.....	51
5.3	VLHKOST A NEČISTOTY	52
5.4	MECHANICKÉ NAMÁHÁNÍ	53
5.4.1	Poruchy motoru zapříčiněné mezizávitovým zkratem rotorového vinutí.....	54
6.	ZÁVĚR	55
	POUŽITÁ LITERATURA	57

1. ÚVOD

Ve své diplomové práci jsem zhodnotil a rozebral izolační systém stejnosměrných elektromotorů z hlediska fyzikálního i z hlediska praktického. Snažil jsem se poukázat na nově vyvinuté izolační materiály, technologie izolačních systémů a na degradační činitele, kteří tento izolační systém znehodnocují a na pozdější následky vzniklé narušením izolačního systému. Práci jsem rozdělil do pěti kapitol, ve kterých jsem dané téma rozvedl.

V první kapitole *Teorie stejnosměrných strojů* jsem popsal stejnosměrné stroje, jejich historický vývoj a zdokonalování. Dále princip činnosti stroje, magnetický obvod, vinutí, konstrukční uspořádání až po provedení buzení stejnosměrných strojů. Na závěr jsem rozebral jejich výhody a nevýhody.

V druhé kapitole *Teorie izolačních systémů* jsem se pokusil nastínit jakými vazbami jsou izolanty vázány a jak se chovají v různých skupenstvích. Popsal jsem, jak může být daný izolant vodivý, co způsobuje jeho vodivost a jaké jsou nosiče elektrického náboje. Jinak se izolant chová samostatně a jinak po vložení do vnějšího elektrického pole. Jak se chová po vložení do elektrického pole a jaké procesy v něm probíhají, ať už jsou to procesy nežádoucí nebo využitelné při zjišťování a hodnocení aktuálního stavu daného izolantu jsem popsal v kapitole Polarizace dielektrika. Závěrem jsem se věnoval charakteristickým vlastnostem izolačních systémů, které jsou důležité pro použití v izolačních systémech elektrických strojů.

Třetí kapitola nazvaná *Provedení izolačního systému* - zprvu zaměřena na důležitost volby izolačního materiálu, který je podle normy ČSN EN 60085 zařazen do teplotní třídy. Teplotní třída se stala základním měřítkem pro třídění izolačních materiálů. Dále jsem izolační materiály rozdělil a přiřadil do jednotlivých teplotních tříd. Nejen zvolený izolační materiál je důležitý pro izolační systém elektrického stroje, ale také technologie které se podílejí na zpracování. V kapitole je zmínka o dvou základních používaných impregnačních metodách pro nízkonapěťové běžně používané stroje a vysokonapěťové izolační systémy elektrických točivých strojů. Následuje provedení izolačního systému konkrétního trakčního stejnosměrného elektromotoru, kde jsem nejdříve popsal dřívější izolační systémy motoru v teplotních třídách 130 (B), 155 (F) a poté jsem navrhl izolační systém trakčního motoru v teplotní třídě 180 (H) za pomoci soudobých materiálů a technologií.

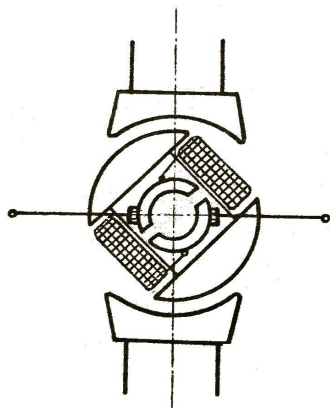
Čtvrtá kapitola nese název *Degrazační činitelé*. V ní jsem popsal, že vlastnosti izolačního systému nejsou dány pouze složením a strukturou samotných izolačních materiálů, ale závisí především na působení degradačních činitelů, kteří izolační systém znehodnocují. Při trvalém působení některých činitelů, tepla a elektrického namáhání, dochází ke stárnutí izolačních systémů. Zestárlost izolace není schopna odolávat působící intenzitě elektrického pole a dochází k průrazu izolantu. K průrazu nedochází jenom při zestárlosti izolace, ale i ztrátami v izolantu a přehříváním, kdy dochází k tepelnému průrazu izolantu. Dalším typem je čistě elektrický průraz, který je závislý na teplotě a velikosti intenzity elektrického pole – začínají se pohybovat elektrony, které svojí energií při srážkách působí oteplení a následný průraz. K průrazu dochází při snížení momentálního izolačního odporu vůči kostře či mezi vodiči vinutí, k průrazu dochází na základě navlhnutí či znečištění daného izolantu. Konec kapitoly je věnován souhrnu, příčinám a následkům poruch na trakčním motoru.

Závěr diplomové práce shrnuje působení degradačních činitelů na jednotlivé části motoru a vysvětluje, proč jsem se věnoval návrhu nového izolačního systému trakčního motoru. Je graficky naznačeno, jak se procentuálně podílí izolační systém na celkových poruchách izolačního systému trakčního motoru.

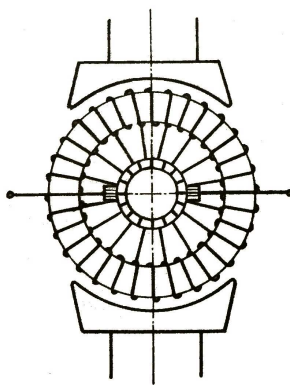
2. TEORIE STEJNOSMĚRNÝCH STROJŮ

2.1. Historický vývoj

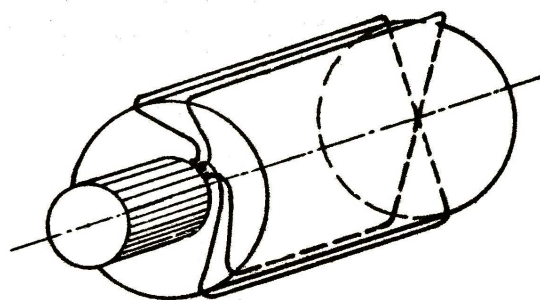
Stejnoseměrné stroje patří k nejstarším používaným elektrickým strojům. První základy stroje předvedl britský fyzik Michael Faraday v roce 1831 v Londýně. Nejprve stroje sloužily k výrobě elektrické energie. K výrobě byla používána dynamo s permanentními magnety, v roce 1867 použil Siemens první elektromagnety, kdy budící cívky byly zapojeny do série s vinutím kotvy. Podstatné změny se dočkal i rotor stroje, původní Siemensova kotva (viz.obr. 2.1) z roku 1856 ve tvaru dvojitého T, což připomínalo svým vzhledem kotvu, byl vylepšen roku 1860 Pacinottim na kotvu prstencovou (viz.obr. 2.2) s rozloženým vinutím. Prakticky využitelný stroj na tomto principu zkonstruoval r. 1868 belgický konstruktér Zénobe Gramme, ten také náhodou roku 1873 zjistil využití dynamo jako stejnosměrného motoru. K dalšímu zdokonalení, které dalo základ uspořádání točivých strojů bylo roku 1873 Hefnerem Alteneckem navrženo bubnové vinutí (viz.obr. 2.3), v jeho myšlence pokračoval i Westinghouse, když roku 1883 zavedl uložení vinutí v drážkách na vnějším povrchu kotvy. Opět Gramme roku 1896 zdokonalil stroj tím, že k odběru proudu použil vícelamelového komutátoru. Stroje tohoto provedení se používají dodnes (viz.obr. 2.4).



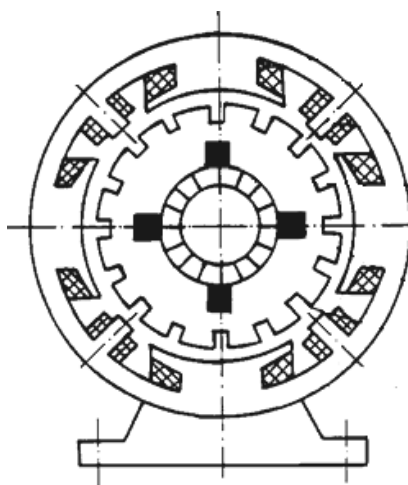
Obr. 2.1 Siemensova kotva
převzato z [5]



Obr. 2.2 Prstencová vinutí
převzato z [5]



Obr. 2.3 Bubnové vinutí
převzato z [5]

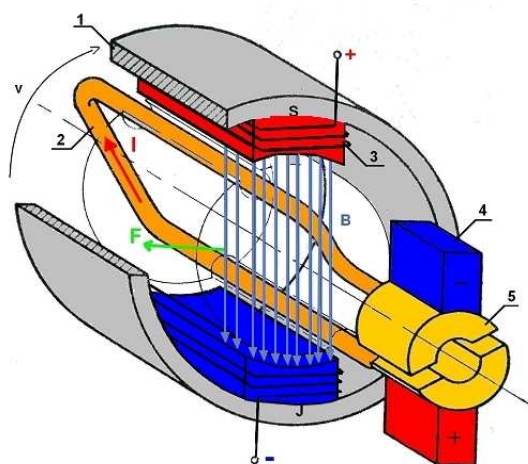


Obr. 2.4 Současná podoba stejnosměrného stroje, převzato z [4]

2.2. Stejnosměrný stroj

Stejnosměrný stroj je zařízení, které přeměňuje energii na principu zákona elektromagnetické indukce a na principu silového působení magnetického pole na vodič protékající proudem. Stroj přeměňující mechanickou energii na elektrickou se nazývá generátor, stroj přeměňující elektrickou energii na mechanickou se nazývá motor. Generátory pracující v obvodech střídavého proudu se nazývají alternátory, v obvodech stejnosměrného proudu dynama.

Výhodou stejnosměrných strojů je, že jak motory, tak generátory mohou pracovat v opačném stavu motor jako generátor a generátor jako motor. Toho se využívá především při elektrodynamickém brzdění a při startování spalovacího motoru generátorem u dieselových lokomotiv.



Obr. 2.5 Principiální schéma stejnosměrného stroje, převzato z [6]

Kde:

(1) magnetický obvod statoru, (2) pracovní vinutí, (3) cívký budicího vinutí, (4) kartáče, (5) komutátor.

2.2.1 Princip činnosti dynama

Činnost dynama je založena na otáčení vodiče v magnetickém poli a indukci napětí u_i . Budicí proud I ve statorovém vinutí vyvolá magnetický tok Φ , tím i podélné magnetické pole ve vzduchové mezeře mezi pólovými nástavci a kotvou. Ve vinutí rotoru se při jeho otáčení otáčkami n v magnetickém poli indukuje tzv. pohybové střídavé napětí u_i , které se komutátorem upevněným na hřídeli rotoru mění na napětí stejnosměrné. Při konstantní rychlosti otáčení rotoru v je okamžitá hodnota indukovaného napětí u_i rovna magnetické indukci B magnetického pole ve vzduchové mezeře. Z komutátoru se stejnosměrné napětí odvádí kartáči na svorkovnici stroje, odkud se odebírá potřebný elektrický proud. Okamžitá hodnota indukovaného napětí je dáno vztahem:

$$u_i = B_{\delta} \cdot l \cdot v \text{ [V]} \quad , \text{ převzato z [4]}$$

Kde:

B_{δ} - magnetická indukce ve vzduchové mezeře [T]

l - délka vodiče v magnetickém poli [m]

v - rychlost pohybu vodiče v magnetickém poli [ms^{-1}]

Na kotvě je celkem N vodičů, které jsou rovnoměrně rozloženy do $2a$ paralelních větví po obvodu kotvy. V sérii je mezi kartáči zapojeno $N/2a$ vodičů. Indukované napětí v N vodičích kotvy je tedy:

$$U_i = B_\delta \cdot l \cdot v \cdot N / 2a = c \cdot \Phi \cdot n \quad [\text{V}] \quad , \text{ převzato z [4]}$$

$$c = \frac{p \cdot N}{2\pi \cdot a} [-]$$

Kde:

c - konstrukční konstanta stroje [-]

Φ - magnetický tok [Wb]

n - otáčky [s^{-1}]

V dnešní době se již dynamy moc nepoužívají, jsou nahrazovány polovodičovými usměrňovači

2.2.2 Princip činnosti motoru

Princip činnosti motoru je založen na průchodu proudu vodičem umístěným v magnetickém poli a vytvoření síly F . Průchodem elektrického proudu hlavními póly se vytvoří magnetický tok, ten prochází od severního k jižnímu pólu přes vzduchovou mezeru a kotvu s vodiči. Vinutí kotvy je přes kartáče a komutátor napájeno stejnosměrným napětím, vodiče jsou umístěny v drážkách po obvodu kotvy. Na vodiče, kterými prochází proud a které se nacházejí v magnetickém poli hlavních budících pólů začne působit síla F , jejíž velikost je dána vztahem:

$$F = B \cdot I_a \cdot l \quad [\text{N}] \quad , \text{ převzato z [4]}$$

Kde:

B - indukce v magnetickém poli [T]

I_a - proud protékající vodičem [A]

l - délka vodiče [m]

Síly působící na jednotlivé vodiče vytvářejí točivý moment a kotva se otáčí. Působením komutátoru se přepíná proud do rotorových cívek, tím mění smysl proudu v cívkách a kotva se otáčí jedním směrem.

Točivý moment stejnosměrných motorů M je:

$$M = c \cdot \Phi \cdot I \quad [\text{Nm}] \quad , \text{ převzato z [6]}$$

$$c = \frac{p \cdot N}{2\pi \cdot a} [-]$$

Kde:

c - konstrukční konstanta stroje [-]

Φ - magnetický tok [Wb]

I - proud motoru [A]

p - počet pólových dvojic

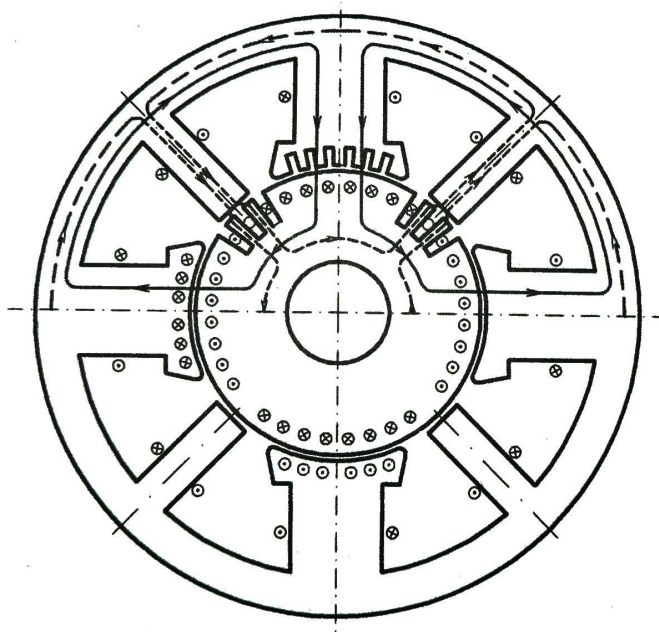
N - počet závitů na kotvě

$2a$ - počet paralelních větví vinutí kotvy

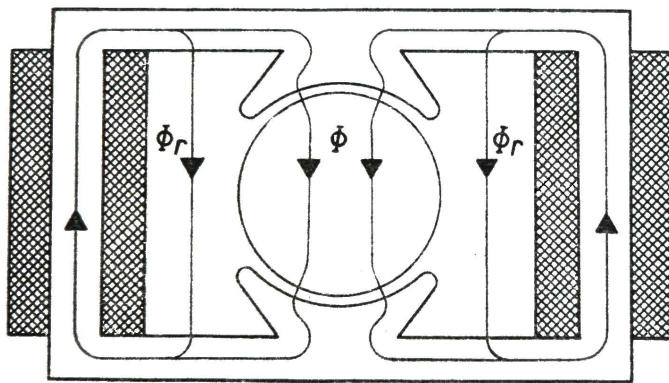
2.3. Magnetický obvod stejnosměrných strojů

Slouží k vedení žádoucího magnetického toku Φ ve stroji.

Magnetický obvod tvoří magneticky vodivé části, jsou to na statoru jho a nástavce budících cívek nebo permanentních magnetů. Na rotoru je to zub rotoru, jho a vzduchová mezera, přes které se uzavírá větší část magnetického toku. Hodnoty magnetické indukce B jsou v rozmezí $B = 1,2-1,5$ T. Pro vzduchovou mezeru 0,2-0,3 mm a $B = 0,8-0,5$ T pro vzduchovou mezeru 1-2 mm. Část magnetického toku, která se uzavírá mimo magnetický materiál, se nazývá rozptylový magnetický tok. Magnetický obvod může mít různé tvary, dnes již nepoužívaný tvar písmene U, nebo stroj se souměrně uloženými cívkami typ Manchester, který se používá díky velkému rozptylovému toku pouze u malých strojků (viz.obr. 2.7). Magnetický obvod statoru by měl mít budící cívky co nejbližší vzduchové mezeře. (viz.obr. 2.6).



Obr.2.6 Magnetický obvod čtyřpólového stroje, převzato z [3]



Obr.2.7 Magnetický obvod se souměrně uloženými cívkami, převzato z [1]

Pro stejnosměrné magnetické obvody se používá materiál magneticky měkký s velkou permeabilitou μ_r a úzkou hysterezní smyčkou $B=f(H)$. Magnetický tok Φ musí být pouze jedné polarity. Na jádra budících cívek se používá plný feromagnetický materiál, měkká elektrotechnická ocel, ocelolitina nebo litina. Pokud se ale uzavírá obvodem proměnný magnetický tok, musí být jádra elektromagnetů kvůli vzniku vířivých proudů složena z navzájem izolovaných plechů pro elektrotechniku, které jsou legovány křemíkem, zvyšující měrný elektrický odpor. Hysterezní ztráty jsou eliminovány výběrem měkkého magnetického materiálu s úzkou hysterezní smyčkou. Kotva je také složena z drážkovaných plechů pro elektrotechniku vzájemně odizolovaných kvůli vzniku vířivých proudů, neboť při komutaci cívek se mění směr proudu v cívkách a tím i směr magnetického toku. Plechy používané pro stejnosměrné stroje jsou neorientované válcované za studena o tloušťce 0,5 mm a ztrátách $\Delta p_{l,0}$ v rozmezí $1,3 - 3,6 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$.

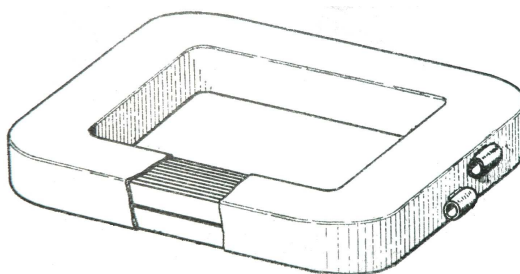
2.4. Vinutí

Již zde se projevuje důležitost izolačního systému elektrického stroje. Vodiče se musí izolovat proti magnetickému obvodu, do kterého jsou vkládány, proti sousedním vodičům uložených v drážce či na povrchu jádra pólového nástavce a proti jiným neaktivním částem elektrického stroje. Především na kvalitě použité izolace vodičů závisí životnost daného elektrického stroje.

Vinutí je aktivní část elektrického stroje a slouží k vedení elektrického proudu ve stroji. Ve stroji je uspořádáno do jednotlivých cívek, které jsou zapojeny podle požadované funkce a části stroje. Vinutí elektrických stejnosměrných strojů se zhotovuje z izolovaných měděných vodičů nebo pásů. Vodiče jsou vyráběny z elektrolytické mědi, protože měď se dá dobře obrobřit spájet a svařovat. Tvrdé mědi s přídavkem stříbra se používá u komutátorů, měkké mědi se využívá při tažení kruhových a profilových vodičů. Tvar vinutí, počet cívek a závitů závisí na druhu a velikosti stroje.

2.4.1 Jádrové vinutí

Jedná se o soustředné vinutí, které je navinuto na jádře v jedné nebo více vrstvách. Používá se pro vinutí hlavních (viz. obr. 2.8) a pomocných pólů umístěných na statoru stroje. U pomocných pólů je méně závitů a vodiče jsou většího průřezu kvůli větším tekoucím proudům. V každém závitě se indukuje stejné napětí, výsledné napětí je dáno součtem těchto napětí. Budící cívky se zapojují sériově, paralelně nebo paralelně ve skupinách, kdežto vinutí pomocných pólů se zapojuje vždy do série s kotvou stroje.



Obr.2.8 Vinutí hlavního pólu TM, převzato z [1]

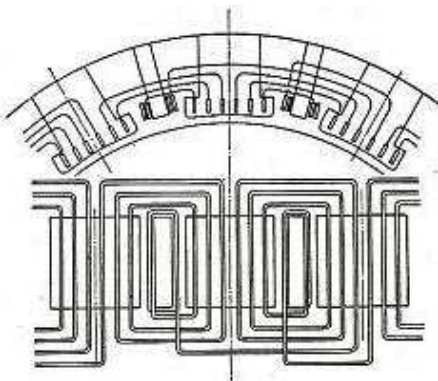
2.4.2 Rozložené vinutí

Používá se především u rotoru stejnosměrného elektrického stroje, kdy je vinutí uloženo v drážkách po obvodu rotoru. Vinutí kompenzační je umístěno v drážkách pólových nastavců rozložených po vnitřním obvodu statoru, je zhotoveno z měděných tyčí.

Vinutí se dále dělí na:

- Soustředné
- Stejného kroku

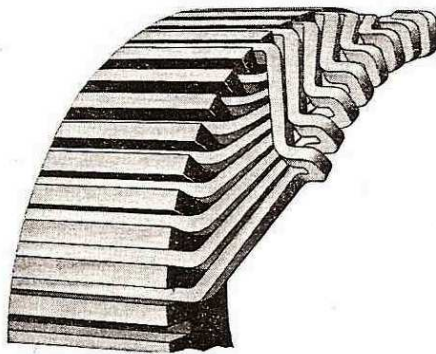
- Soustředné - jeho nevýhoda spočívá v různé velikosti a tvaru jednotlivých cívek. Vinutí je využíváno pro kompenzační vinutí velkých strojů (viz.obr. 2.9).



Obr.2.9 Kompenzační vinutí , převzato z [28]

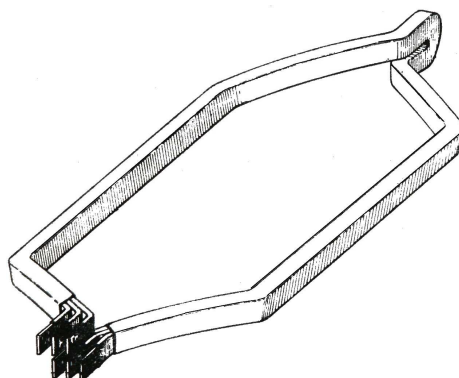
- Stejného kroku - předností vinutí je stejná velikost i tvar, využívá se u kotev stejnosměrných strojů (viz.obr. 2.10). Podle způsobu připojení cívek ke komutátoru dělíme vinutí na dvě nejpoužívanější:

- Smyčkové
- Vlnové



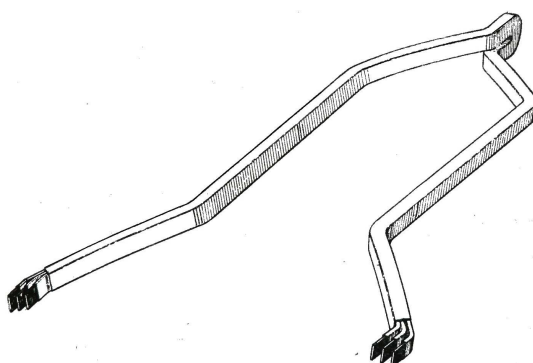
Obr.2.10 Vinutí kotvy , převzato z [28]

- **Smyčkové** - cívky smyčkového vinutí jsou spojeny s lamelami v jeden systém, vzdálenost aktivních stran cívky je zhruba vzdálenost pólové rozteče τ_p , tzn. každá strana leží pod póly opačné polarity. Začátek a konec cívky je připojen k sousedním lamelám na komutátoru \Rightarrow krok komutátoru y_k je roven 1. Podle počtu hlavních pólů a kartáčů rozlišujeme u smyčkového vinutí počet proudových okruhů. Vinutí se používá většinou dvouvrstvé, tzn. v drážce jsou uloženy dvě cívkové strany různých cívek. Při průchodu proudu vinutím se jeví jako kdyby obíhal ve smyčkách, odtud i název pro vinutí. Smyčkovému vinutí se říká paralelní a používá se u strojů pro nízká napětí a velké proudy (viz.obr. 2.11).



Obr.2.11 Cívka smyčkového vinutí, převzato z [1]

- **Vlnové** - cívky vlnového vinutí mají vzdálenost začátku a konce cívky rovnou dvounásobku pólové rozteče τ_p . Vinutí má počet do série zapojených cívek roven počtu pólpárů. Počet lamel komutátoru musí být vždy lichý, aby nedošlo ke spojení konce cívek se začátkem první cívky. Proud prochází vinutím jako kdyby po vlnách, od toho dostalo i svůj název. Vinutí je vhodné pro stroje pracující s větším napětím a menšími proudy (viz.obr. 2.12).



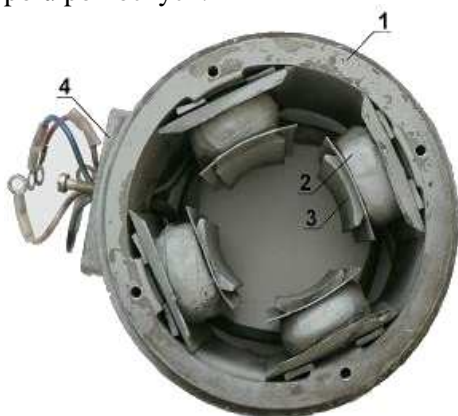
Obr.2.12 Cívka vlnového vinutí, převzato z [1]

2.5. Konstrukční uspořádání stejnosměrného motoru

Mezi hlavní části stejnosměrného motoru patří pevná část stator a otáčivá část rotor. Konstrukční části umožňující činnost stroje jsou umístěny na statoru i rotoru, patří mezi ně ložiskové štíty, sběrné ústrojí i ventilátor kotvy.

2.5.1 Stator stejnosměrného stroje

Slouží k vytvoření magnetického toku prostřednictvím hlavních pólů, k potlačení reakce kotvy za pomoci pólů pomocných.

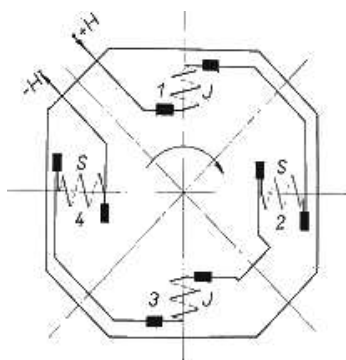


Kde:

- (1) - odlitá válcová kostra
- (2) - budícího vinutí
- (3) - hlavní póly
- (4) - místo pro svorkovnici

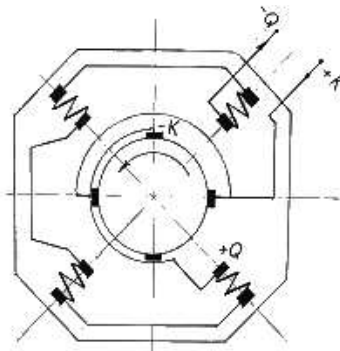
Obr.2.13 Stator elektromotoru

- **Hlavní póly** - hlavní budící póly jsou připevněny k zesíleným místům pomocí šroubů po obvodu statoru, slouží k vytvoření magnetického toku. Snýtovaná jádra plechů jsou navzájem odizolovaná, tím zabraňují vzniku vířivých proudů. Při použití plného materiálu, by se jádro jevilo jako závit nakrátko a zpomalovalo by hlavní magnetické pole. Budící vinutí je vyrobeno rovněž jako samostatná část. Cívky jsou spojeny tak, aby se polarita pólů po obvodu střídala (viz.obr.2.14). Počet budících pólů je vždy sudý. Kraje pólů mají klínovou mezeru, jsou rozevřeny. Tím vznikne pozvolný přechod mezi oblastí maximálního a nulového pole, zamezí se přesycování pólů příčným polem kotvy.



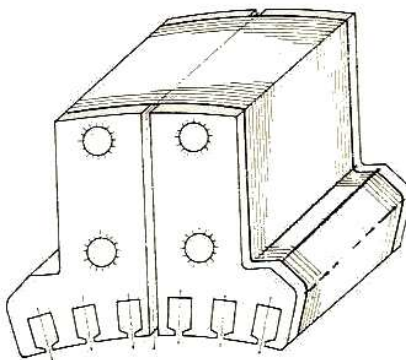
Obr.2.14 Zapojení hlavních budících pólů trakčního motoru TE 005, převzato z [6]

- **Pomocné póly** - pro větší stroje se konstruují pomocné póly, které slouží ke zlepšení komutace, proto se jim říká komutační póly. Jsou umístěny na statoru vždy mezi hlavními póly. Mají stejnou polaritu jako sousední pól hlavní, proti smyslu otáčení kotvy. Jádra pomocných pólů jsou vyrobena z plného materiálu, na nich je nasazeno vinutí, kterým protéká proud kotvy. Slouží ke kompenzaci magnetického napětí reakce kotvy v neutrálním pásmu a ke kompenzaci indukujícího se napětí v komutující cívkce. Cívky pólů jsou spojeny s kotvou, se kterou tvoří elektricky jeden celek (viz.obr.2.15).



Obr.2.15 Zapojení pomocných pólů trakčního motoru TE 005, převzato z [6]

- **Kompenzační vinutí** - Jak jsem naznačil, kompenzační vinutí se provádí u větších strojů a bývá uloženo v drážkách hlavních pólů (viz.obr. 2.16). Jeho účelem je vykompenzovat reakční napětí kotvy v prostoru pod pólovými nástavci hlavních pólů. Zapojuje se tak jako pomocné póly, do série s vinutím kotvy.



Obr.2.16 Jádro hlavního pólu s drážkami pro kompenzační vinutí, převzato z [28]

2.5.2 Rotor stejnosměrného stroje

Je otáčivá část stroje, do jehož vinutí za pomoci komutátoru proud do kotvy přivádíme \Rightarrow stroj slouží jako motor nebo proud z kotvy odebíráme \Rightarrow stroj pracuje jako dynamo.

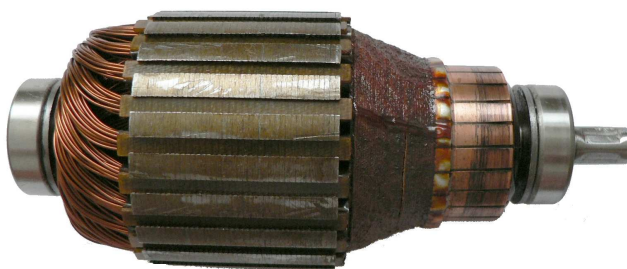


Kde:

- (1) - komutátor
- (2) - nalisované plechy
- (3) - drážky pro vinutí
- (4) - vlastní ventilátor
- (5) - ložiska

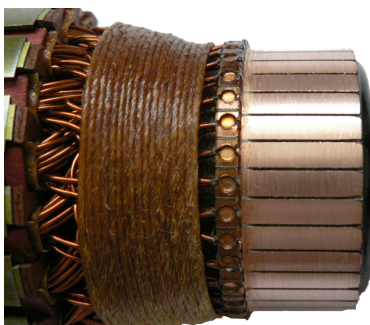
Obr.2.17 Rotor elektromotoru

- **Kotva** - části stroje, z níž je odebírán elektrický proud se říká kotva - v našem případě je to rotor stroje. Kotva je složená z plechů pro elektrotechniku (vzájemně odizolovaných kvůli vířivým proudům) s drážkami. (viz. obr. 2.18). V drážkách je uloženo vinutí, jednotlivé cívky vinutí kotvy jsou připojeny ke komutátoru. Drážky jsou uzavřené klínkem. Kotva musí být dynamicky vyvážená, proto se kladou do drážek, kotoučů a do komutátoru vyvažovací závaží.



Obr.2.18 Kotva elektromotoru

- **Komutátor** - zajišťuje přepínání proudu do rotorových cívek tak, aby byla napájena vždy cívka pod aktivním pólem a byla dosažena co největší účinnost stroje. Skládá se ze vzájemně izolovaných měděných lamel, ke kterým jsou přivedeny vodiče různých cívek. Celé vinutí rotoru je přes komutátor propojeno. Čím více lamel komutátor má, tím je výstupní stejnosměrné napětí u dynama stabilnější a méně zvlňné (viz.obr. 2.19). Lamely komutátoru jsou z mědi s přísadou stříbra.



Obr.2.19 Komutátor

2.5.3 Sběrné ústrojí

Sběrné ústrojí je umístěno na předním štítě na straně komutátoru, je složeno z kartáčů uložených v držácích, které jsou obvodu komutátoru v kladných a záporných řadách s pravidelnou roztečí danou počtem hlavních pólů. Držák kartáčů mechanicky vede, pružina vytváří přítlačnou sílu na kartáč a ten tvoří s komutátorem kluzný kontakt a přivádějí proud do rotorových cívek. V době komutace zkratuje lamely komutátoru, tím se mění směr proudu procházející cívkami. (viz.obr. 2.20).

Roubíky, na kterých je držák kartáčů připevněn jsou izolovaně uloženy v tzv. brýlích nebo přímo ve štítě motoru. Natočením brýlí nebo celého štítu se sběrným ústrojím se nastavují kartáče do neutrální polohy.



Kde:

- (1) - uhlíkové kartáče
- (2) - držáky kartáčů
- (3) - přítlačná péra
- (4) - propojovací kabely
- (5) - izolátory držáků

Obr.2.20 Sběrné ústrojí elektromotoru

2.6. Provedení buzení stejnosměrných motorů

- S permanentními magnety
- S budícím vinutím
- **S permanentními magnety** - jsou nejjednoduššími motory na stejnosměrný proud, jejich stator je tvořen permanentním magnetem a kotva elektromagnetem s dvěma nebo více póly pro zamezení vzniku mrtvého úhlu motoru (viz.obr. 2.21). Výhodou motoru je, že se jeho otáčky dají lehce změnit polaritou napájecího napětí. Dnes motorky s permanentními magnety našly uplatnění nejvíce v modelech a hračkách.

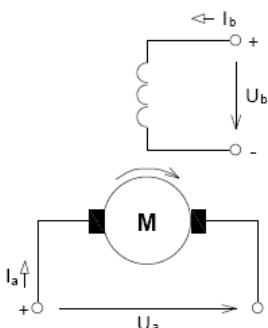


Obr.2.21 Motorky s permanentními magnety na statoru

- **S budícím vinutím** - jsou to motory, které mají místo permanentního magnetu na statoru použit elektromagnet. Podle zapojení budícího vinutí a rotoru rozlišujeme základní zapojení:

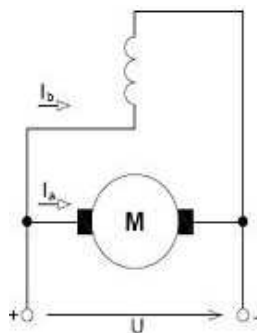
2.6.1 Zapojení budícího statorového vinutí

- Cize buzené motory
- Derivační motory
- Sériové motory
- Kompaundní motory
- **Cize buzené motory** - stator je napájen nezávislým zdrojem (budičem) nezávisle na kotvě. Motor patří mezi motory s tvrdou otáčkovou charakteristikou, při stálém napětí kotvy U_k a stálém toku ϕ otáčky jen nepatrně klesají. Nejčastěji se používají v regulačních pohonech pro nejrůznější aplikace ve spojení s polovodičovými měniči, v pohonech těžních a obráběcích strojů.



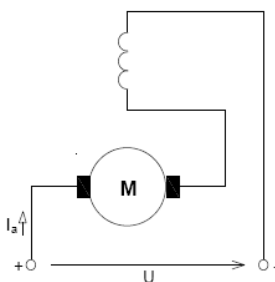
Obr.2.22. Schéma zapojení, převzato z [21]

- **Derivační motory** - statorové vinutí je připojeno paralelně ke kotvě, protéká jím proud odpovídající napětí kotvy. Otáčky motoru jsou méně závislé na zátěži. Motor se využívá tam, kde jsou požadovány neměnné otáčky, např. pro ventilátory a naftová topení.



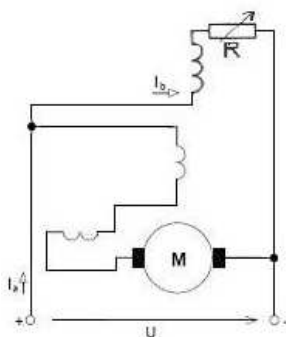
Obr.2.23 Schéma zapojení, převzato z [21]

- **Sériové motory** - statorové vinutí je spojeno do série s kotvou a je protékáno proudem kotvy. Tyto motory jsou nejčastějším typem trakčních motorů, používají se jak u lokomotiv tak u městské hromadné dopravy, pro svůj výhodný průběh otáčkové charakteristiky, kdy při nulových otáčkách je největší záběrný moment motoru.



Obr.2.24 Schéma zapojení, převzato z [21]

- **Kompaundní motory** - mají vinutí sériové a vinutí derivační. Jejich vlastnosti se blíží takovému typu motoru, jehož vinutí převládá. Používají se především u zdvihacích mechanismů.



Obr.2.25 Schéma zapojení, převzato z [21]

2.7. Výhody a nevýhody stejnosměrných strojů

I přesto že jsou stejnosměrné motory postupně vytlačovány a nahrazovány motory asynchronními, mají širokou škálu použití od nejmenších motorků s výkonem několika Wattů pro modely, hračky, ale i pro ruční nářadí, kde jsou napájeny střídavým napětím, až do mega Wattů pro elektrické pohony. Elektrický pohon se stejnosměrným motorem je zvláště rozšířen v dopravě a to jak v železniční (viz.obr. 2.26) tak i městské, dále u válcovacích stolic, v těžebním a automobilovém průmyslu.

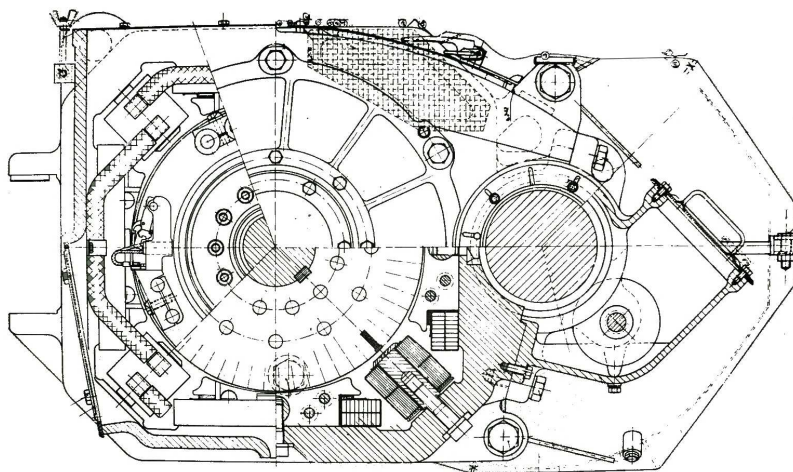
Stejnoseměrné motory jsou nahrazovány modernějšími asynchronními motory, ale mají své přednosti:

- Velký záběrný moment při malých otáčkách
- Jednoduchá otáčkovou regulaci
- Velká výkonová i momentová přetížitelnost
- Snadné reverzace
- Sériový motor má univerzální použití

Nevýhody stejnosměrných motorů:

- Existence komutátoru a kartáčů
- Náročnost na údržbu
- Trvalé spojení s poháněným zařízením

Důležitou roli při způsobu zatěžování a použití stejnosměrného motoru má jeho izolační systém.



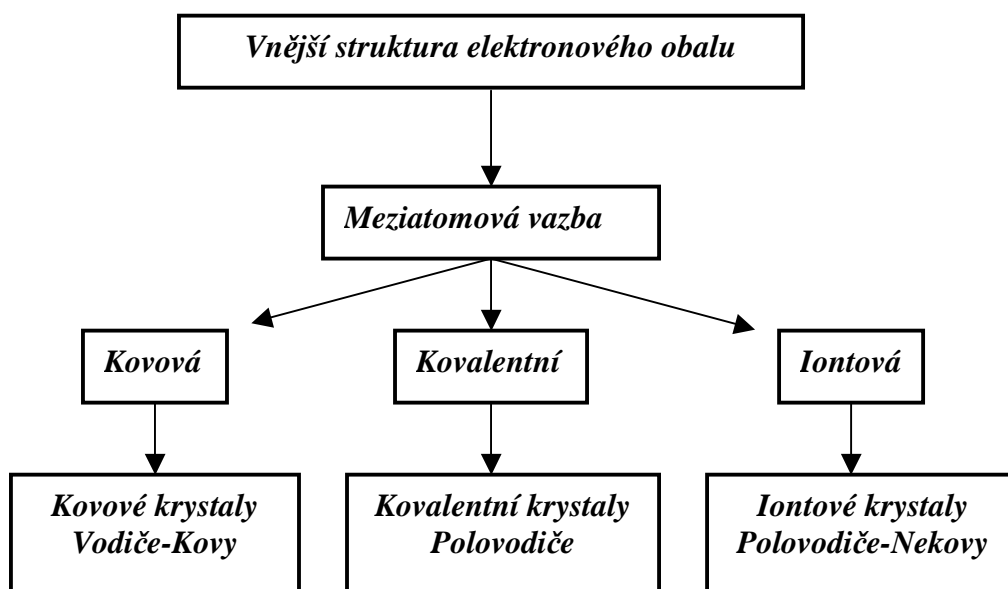
Obr.2.26 Příčný řez trakčním motorem TE 005, převzato z [6]

3. TEORIE IZOLANTŮ

Izolant je speciálně upravená látka, která se díky své schopnosti klást velký elektrický odpor a zabránit průchodu proudu využívá především v elektrických zařízeních pro vzájemné odizolování dvou míst s různým elektrickým potenciálem. Izolant má v elektrických zařízeních velice důležitou roli a jsou na něj kladeny i nemalé nároky.

3.1 Vazba atomů a struktura látek

Podle funkce můžeme materiály rozdělit do třech základních skupin na: *vodiče*, *polovodiče* a *izolanty*. Vlastnosti daného materiálu jsou dány strukturou vnějšího elektronového obalu atomu prvku, který ovlivňuje chemické a fyzikální vlastnosti látek a danou meziatomovou vazbu. Meziatomová vazba vzniká interakcí elektronů při přibližování atomů k sobě. Charakter a intenzita vazby je určena rozložením atomů v prostoru a jsou jí dány vlastnosti materiálu podle schématu (viz.obr. 3.1)



Obr.3.1 Struktura a vazba látek, převzato z [9]

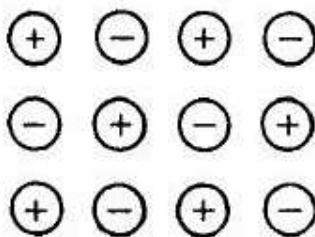
Veškeré látky se skládají z atomů, atomy se vážou do molekul, což jsou nejmenší samostatně existující látky mající všechny chemické vlastnosti dané látky. Molekuly mohou být jednoatomové, jejich představiteli jsou molekuly inertních plynů nebo víceatomové, která se skládají z více atomů téhož prvku.

3.1.1 Meziatomové vazby

Meziatomové vazby mohou být různého typu, rozdělujeme je na tři základní:

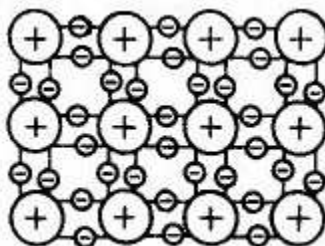
- Iontová
- Kovalentní
- Kovová

- **Při iontové vazbě** - reagující atom předá jinému atomu z valenční sféry elektron, tím se stává iontem kladným a záporným. Každý iont působí přitažlivými silami na okolní ionty opačné polarity, váže se iontovou vazbou. Nevznikají zde volné částice pro vedení proudu a látka se stává izolantem.



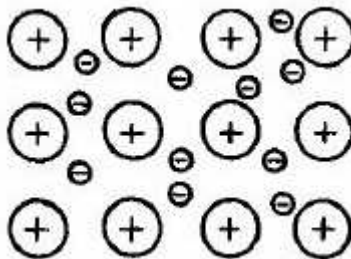
Obr.3.2. Iontová vazba, převzato z [10]

- **K vazbě kovalentní** - dochází na základě výměny elektronů ve valenční sféře. Atomy s kovalentními vazbami mají ve svých elektronových obalech spárovány elektrony do dvojic a jsou vázané k jednomu nebo více atomům. Přitažlivé síly působí mezi jádry elektronů a protonů. Odpudivé síly u protonů obou atomů udržují soustavu v rovnováze. Mohou vznikat volné elektrony, které by mohly přenášet elektrický náboj.



Obr.3.3. Kovalentní vazba, převzato z [10]

- **Vazba kovová** - se vyskytuje u kovů. Volné elektrony vzniknou tak, že se snadno oddělí od atomu. Kladně nabité ionty jsou obklopeny elektronovým plynem, který udržuje rovnováhu jejich odpudivým silám. Volné elektrony pak mohou vést elektrický náboj.



Obr.3.4. Kovová vazba, převzato z [10]

3.1.2 Polárnost a nepolárnost látek a skupenství látek

- **Polární látky** - obsahují ve svém objemu stálé dipólové momenty i bez přispění vnějšího elektrického pole. Působením elektrického pole natáčí své dipólové momenty ve směru elektrického pole a zesilují ho.
- **Nepolární látky** - mají dipólový moment nulový, který se vytvoří působením elektrického pole. Těžiště kladných a záporných nábojů přestává být společné, vznikají neutrální molekuly a ty mají elektrický moment.

Dipólový moment je vektorová veličina určitého směru a velikosti, popisující rozdělení elektrického náboje v molekule nebo ve skupinách atomů. Je tvořen dvojicí nábojů o stejné velikosti, ale opačného polarity. Polárnost či nepolárnost látky souvisí s typem meziatomové vazby (viz.tab.3.1)

VAZBA	Polárnost látek	
IONTOVÁ	Počet iontů v molekule	
	dva ionty	dva a více iontů
	POLÁRNÍ	POLÁRNÍ, NEPOLÁRNÍ
	Závislost na vzájemné orientaci vazeb mezi ionty v molekule	
KOVALENTNÍ	Vazba dvou stejných atomů	
	Symetrické uspořádání elektronových obalů	Nesymetrické uspořádání elektronových obalů
	NEPOLÁRNÍ	POLÁRNÍ
	Těžiště kladných a záporných nábojů splývá nebo nesplývá	

Tab.3.1 Meziatomové vazby a polárnost látek, převzato z [8]

Důležitou úlohu při dělení materiálů hraje teplota prostředí, v němž materiál pracuje. Různě se chová při vysokých teplotách a při teplotách velmi nízkých. Jednou se materiál může chovat jako vodič, jindy jako izolaⁿt, na to má vliv skupenství a vnitřní struktura látek. Názo^rná ukázka je uvedena v tabulce jak se chovají reagující prvky v různém skupenství (viz.tab.3.2).

Reagující prvky	Skupenství		
	tuhé	kapalné	plynné
nekov – nekov	Vazba kovalentní Izolaⁿt Polovodič	Vazba kovalentní Izolaⁿt	Vazba kovalentní Izolaⁿt
nekov – kov	Vazba iontová Izolaⁿt Polovodič	Vazba iontová Vodič II.třídy	Vazba iontová Izolaⁿt
kov – kov	Vazba kovová Vodič I.třídy	Vazba kovová Vodič I. a II.třídy	Žádná vazba Jednotlivé molekuly Izolaⁿt

Tab.3.2 Rozdělení látek podle vzniku a skupenství, převzato z [8]

3.2 Nosiče elektrického náboje v izolantu

Nosičem elektrického náboje jsou ionty a elektrony. Ionty vznikají z atomu přidáním nebo odebráním elektronu, po přidání elektronu neutrálnímu atomu vzniká záporný iont a odebráním elektronu vzniká kladný iont. Podle velikosti vazebných sil ve struktuře látky rozlišujeme nosiče elektrického náboje volné a vázané.

Elektrická vodivost izolanů je způsobena volně se pohybujícími ionty příměsí a nečistotami. U izolanů s iontovou vazbou mohou být nosičem náboje ionty uvolněné z vlastní krystalové mřížky. Elektrony se na vodivosti materiálu podílejí teprve až při velmi vysokých teplotách nebo při působení silného elektrického pole, což se nazývá elektrickou vodivostí *dielektrika*.

Vázané nosiče elektrického náboje mají ve struktuře látky pevně stanovené místo a na působení elektrického pole reagují menším či větším posuvem nosičů náboje, děj se nazývá *polarizace*.

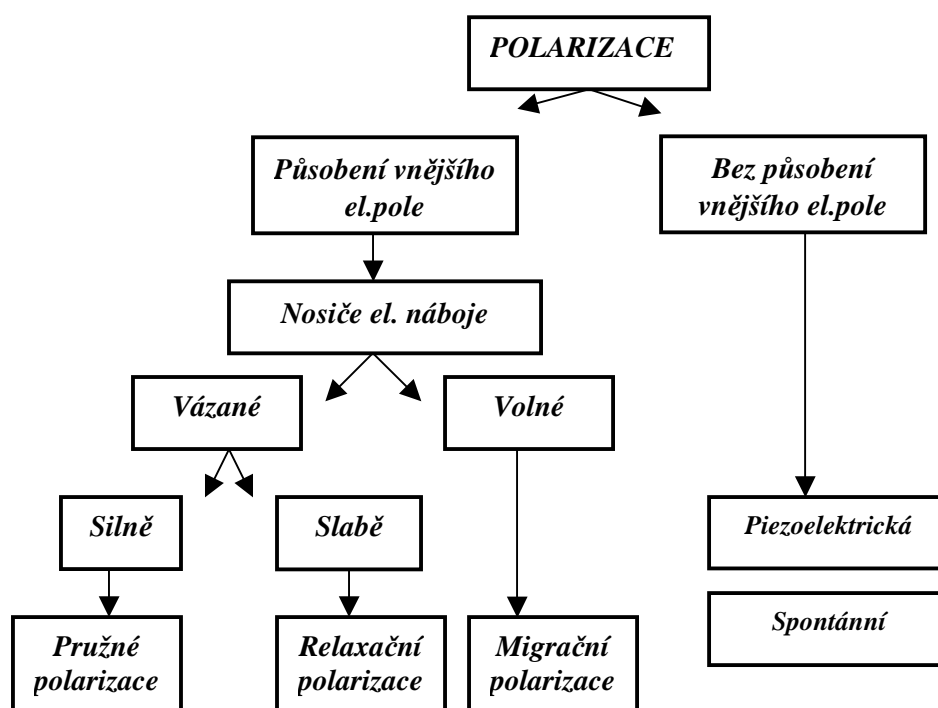
3.2.1 Dielektrika a izolanty

- **Dielektrikum** - je nadřazenější pojem izolanů, je to látka, která po vložení do elektrického pole vytvoří vlastní vnitřní elektrické pole. Látka se vnějším elektrickým polem polarizuje. Dielektrikum chápeme jako zeledizované prostředí, používají se u kondenzátorů.
- **Izolant** - je speciálně upravená látka, která se díky své schopnosti klást velký elektrický odpor a zabránit průchodu proudu využívá především v elektrických zařízeních pro vzájemné odizolování dvou míst s různým elektrickým potenciálem.

Dielektrika a izolanty spolu úzce souvisí. Dielektrikum je obecný název, znamená, že každý izolant je dielektrikem, ale naopak to neplatí. Izolant je podsystémem dielektrik.

3.3 Polarizace dielektrika

Je to děj, který probíhá v dielektriku po vložení látky do elektrického pole. Při tomto ději se posouvají vázané nosiče elektrického náboje, které mají pevné místo ve struktuře látky. Nosiče náboje mohou být svázány silně nebo slabě. Existují však i volné nosiče náboje, které vznikají teprve až po přiložení elektrického pole. Zvláštním typem polarizací jsou bez přiložení elektrického pole, ty se polarizují např. vlivem mechanického namáhání. V elektrickém obvodu se tento děj projevuje jako nahromadění náboje na elektrodách. Důležitou roli při chování látek v elektrickém poli hraje polárnost látek, která úzce souvisí s použitím v izolačních systémech elektrických zařízení. S polárností souvisí tepelné ztráty a hodnota relativní permitivity. V izolantech se vyskytuje několik druhů polarizací (viz. obr.3.5), kdy silnější převládají nad slabšími. O tom jak daná polarizace bude probíhat rozhoduje struktura a stavba daného dielektrika.



Obr.3.5. Druhy polarizačních mechanismů, převzato z [8]

3.3.1 Pružné polarizace

Projevují se rychlými průběhy a velice krátkou dobou trvání, v rozsahu (10^{-12} až 10^{-13} s). Vázané nosiče nábojů, elektrony, ionty i stálé dipóly jsou v atomech, molekulách i krystalech vázány velice pevně, proto je působící pole posune jen nepatrně. Polarizace probíhají pružně a bez jakýchkoliv ztrát. Na ději se podílí značné množství nosičů, proto dochází ke změnám relativní permitivity. Do skupiny pružných polarizací řadíme:

- Elektronovou polarizaci
- Iontovou polarizaci
- Dipólovou polarizaci
- **Elektronová polarizace** - má za následek deformaci dráhy záporného elektronového obalu okolo kladného náboje jádra. Nejslaběji jsou vázány valenční elektrony, proto se posouvají, ale ne výrazně, velkými rychlostmi se dostávají zpět na svá místa. Tato polarizace probíhá vždy ve všech látkách a ve všech skupenstvích. Tato polarizace není tepelně závislá, neboť děj probíhá uvnitř atomů a je beze ztrát.
- **Iontová polarizace** - ionty se posouvají v iontových krystalech a ionty vázány velice silnými vazbami. Dochází k posunutí a opět ustálení za určitou dobu.
- **Dipólová polarizace** - Molekuly vázány pružnými vazbami se posouvají, ale protože jsou vázány velice silně, nedochází k posunu jednotlivých molekul, ale celku.

3.3.2 Relaxační polarizace

Na polarizacích se podílejí slabě vázané částice. V pevných dielektrikách se slabě vázané ionty a elektrony objevují v blízkostech defektů krystalické struktury látky. Velkou roli zde hraje tepelný pohyb nosičů, který je zprvu chaotický a nedochází k nerovnoměrnému rozložení, všechny možné polohy nosičů jsou stejné. Po přiložení elektrického pole se určité polohy nábojů stanou energeticky výhodnějšími, nosiče se rozloží nerovnoměrně a mohou lépe překonávat potenciálové bariéry. Po ukončení působení elektrického pole se nosiče vracejí do svých výchozích poloh, ale to trvá určitou dobu nazývanou relaxační doba. Protože dochází k tepelnému pohybu, jsou relaxační polarizace ztrátové. Rozlišujeme 2 základní druhy polarizací:

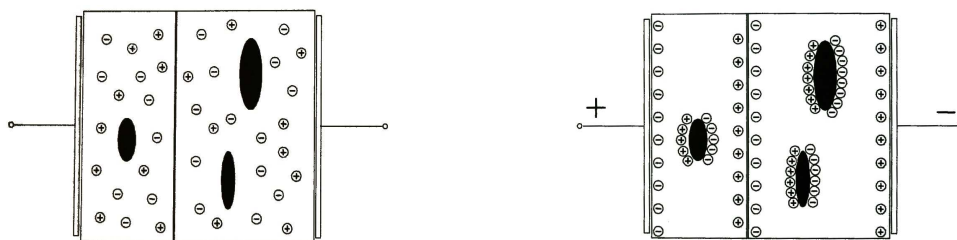
- Iontová relaxační polarizace
 - Dipólová polarizace
-
- **Iontová relaxační polarizace** – se projevující především u látek složených z iontů nebo u látek, které obsahují molekuly a atomy slabě vázané k částicím látky. Např. keramické látky s obsahem skloviny.
 - **Dipólová polarizace** - velice slabě vázané dipólové molekuly se při působení pole snadno natáčí ve směru působícího pole a dochází ke zpolarizování látky. K tomu výrazně napomáhá teplota, při které se zmenšují překážky pro polarizaci, ale molekuly zvětšují tepelný pohyb a dochází k zeslabování polarizace.

Při pochodech, které probíhají při zjišťování stavu izolace elektrických zařízení se nejvíce uplatňuje relaxační polarizace, která je úzce spjata s absorpčním proudem, jehož strmost časového průběhu charakterizuje aktuální stav daného dielektrika. Zjišťování stavu izolace se budu věnovat samostatnou kapitolu Činitel polarizace, absorpční proud a zjišťování stavu izolace.

3.3.3 Migrační polarizace

Zde se zúčastňují polarizace volné nosiče elektrického náboje, které působením elektrického pole vznikají na nečistotách, bublinkách či prasklinkách dielektrika. Na určité nehomogenity mají vliv i degradační činitelé, kteří izolaⁿt znehodnocují. Migrační polarizace se vyskytuje u vysokonapěťových zařízení pracujících se stejnosměrným napětím nebo v oblasti nízkých a středních kmito^tů i na rozhraních složených izolaⁿčních systémů.

Nežádoucím jevem migrační polarizace je vznik prostorového náboje, který neblaze ovlivňuje izolaⁿční systém elektrických strojů, především jeho vodivost a elektrickou pevnost (viz.obr.3.6). Jsou to nejpomalejší polarizace se ztrátou energie.



Obr. 3.6 Migrační proces v izolaⁿtu bez přiloženého el.pole
a s přiloženým el. polem, převzato z [8]

3.3.4 Polarizace bez působení elektrického pole

Jsou to zvláštní polarizace existující v malé míře i bez přispění vnějšího elektrického pole, jejich zpolarizování je vyvoláno bu^ď cizími vlivy, (např. mechanická namáhání), nebo se po vložení do elektrického pole chovají specificky. Tyto polarizace se nevyskytují u izolaⁿčních systémů, ale např. u miniaturních keramických kondenzátorů. Do této skupiny řadíme:

- Piezoelektrickou polarizaci
- Spontánní polarizaci
- **Piezoelektrická polarizace** - probíhá v látkách, které jsou schopny zpolarizovat se vnějším mechanickým namáháním. Po stlačení piezoelektrika se na povrchu objeví vázaný náboj. Tyto látky jsou schopny i opačného jevu, který vzniká na základě elektrického působení na látku a ta se mechanicky zdeformuje a mění svoje rozměry.
- **Spontánní polarizace** - projevuje se u látek s doménovou strukturou. Domény jsou oblasti izolaⁿtu polarizované bez působení vnějšího pole a mají dipólový moment. Uspořádání momentů jednotlivých domén je takové, že se navzájem vyrušují a látka se jeví jako nepolarizovaná. Teprve až po přiložení elektrického pole se jednotlivé momenty orientují ve směru pole a projeví se polarizace. Spontánní polarizace závisí na teplotě, kmito^tu a intenzitě elektrického pole. Typickým znakem feroelektrik je nelineární závislost polarizace P na intenzitě elektrického pole. Průběh je charakterizován hysterezní smyčkou. Tohoto jevu se u elektrických strojů nevyužívá, použití je především při výrobě miniaturních keramických kondenzátorů.

3.3.5 Relativní permitivita

Relativní permitivita ϵ_r je materiálová veličina a ukazuje do jaké míry je daná látka polarizovatelná. Její velikost je závislá především na druhu probíhající polarizace, na vnitřní stavbě izolantu, intenzitě elektrického pole E a teplotě. Relativní permitivita vyjadřuje kolikrát se elektrické síly mezi náboji zmenší, tím se molekuly rozpadají na ionty, které jsou schopny vést elektrický náboj.

Vztah pro výpočet relativní permitivity:

$$\epsilon_r = 1 + \frac{\overline{P}}{\epsilon_0 \cdot E} \quad [-] \quad , \text{převzato z [9]}$$

$$\overline{P} = \kappa \cdot \epsilon_0 \cdot E \quad [\text{C} \cdot \text{m}^{-2}] \quad , \text{převzato z [8]}$$

$$E = \frac{U}{d} \quad [\text{V} \cdot \text{m}^{-1}] \quad , \text{převzato z [8]}$$

Kde:

ϵ_0 - permitivita vakua $8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$

E - intenzita elektrického pole $[\text{V} \cdot \text{m}^{-1}]$

κ - koeficient polarizace $[-]$

\overline{P} - je vektor polarizace $[\text{C} \cdot \text{m}^{-2}]$

U nepolárních izolaŤtů, u kterých při působení pružných iontových a elektronových polarizací dochází k posuvu nosičů elektrického náboje a vznikají indukované dipólové momenty je relativní permitivita $\epsilon_r < 2,5$.

U polárních izolaŤtů při působení nepružné relaxační polarizace dochází k pootočení dipólů a relativní permitivita je v rozmezí jednotek až desítek (anorganická skla, keramické látky s obsahem skloviny).

Největší relativní permitivita je u feroelektrik s iontovou relaxační a spontánní polarizací, která je v rozmezí: $\epsilon_r = 10^3 - 10^4$.

Typ polarizace	ϵ_r	látka	Polárnost látky
Pružné iontové a elektronové	< 2,5	Parafín, polystyren, polyetylen	Nepolární
Nepružné relaxační	1-10	PVC, reaktoplast, pryskyřice	Polární
Iontová relaxační spontánní	1000	Voda, feroelektrika	Silně polární

Tab.3.3 Typ polarizace a relativní permitivita, převzato z [10]

3.4 Absorpční proud, činitel polarizace a stav izolace

Jak jsem již naznačil v předchozí kapitole, polarizace dielektrika, především pak pomalé relaxační polarizace a děje s ní svázány se dá využít při zjišťování aktuálního stavu izolace elektrických strojů. Relaxační polarizace je spjata s absorpčním proudem, jehož časový průběh charakterizuje aktuální stav dané izolace. Princip je založen na připojení stejnosměrného napájecího napětí k deskám kondenzátoru, v němž je vloženo izolant. Vlivem polarizací a pohybu silně vázaných nábojů, nečistot a příměsí začne izolantem protékat elektrický proud, který se časem klesá k nule a je nazýván jako absorpční. Proud vyvolává náboj Q_r , který zvětšuje kapacitu kondenzátoru a časová změna velikosti náboje se projeví časově proměnným proudem. Nabíjení a vybíjení kondenzátoru tedy není okamžité, ale je zpožděné a zvětšuje se jeho kapacita v důsledku právě dielektrických polarizací a absorpčního proudu, který děj zpomalují. Přechodný proud se skládá z:

- Nabíjecího proudu i_0
- Dobíjecího proudu $i_d = \text{absorpční proud } i_a + \text{vodivostní proud } i_v$
- Vodivostního proudu $i_v = \text{vybijecí proud } i_k + \text{resorpční proud } i_r$
- **Nabíjecí proud i_0** - velikost je dána omezujícím odporem zdroje, přívodů R_0 a velikostí napětí U . Po nabití kapacity C_0 velmi rychle exponenciálně klesá k nule s časovou konstantou:

$$\tau = R_0 \cdot C_0 \quad ,\text{převzato z [8]}$$

- **Absorpční (zpožděný) proud i_a** - je roven součtu proudů při relaxačních polarizacích, které probíhají v izolantu velmi pomale. Proud je časově proměnný a s časem klesá k nule, rychlost tohoto poklesu závisí na struktuře a stavu izolantu. Je způsoben polarizací silně vázaných nábojů a vznikem prostorového náboje. V blízkosti elektrod vlivem polarizací vzniká náboj Q_r , který zvyšuje kapacitu kondenzátoru C_p a právě časová změna velikosti náboje Q se projevuje časově proměnným proudem. Časová závislost náboje Q_r na elektrodách je daná integrálem absorpčního proudu. U suché izolace je absorpční proud malý. Při zvlhlé izolaci je proud poměrně velký, ale řádově μA . Velikost proudu se mění se stavem izolantu, který může být zvlhlý nebo degradován stárnutím.

$$Q_r(t) = \int_0^t i_a dt = Q_s \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad ,\text{převzato z [8]}$$

$$C_p = \frac{Q_r}{U} \quad ,\text{převzato z [8]}$$

Kde:

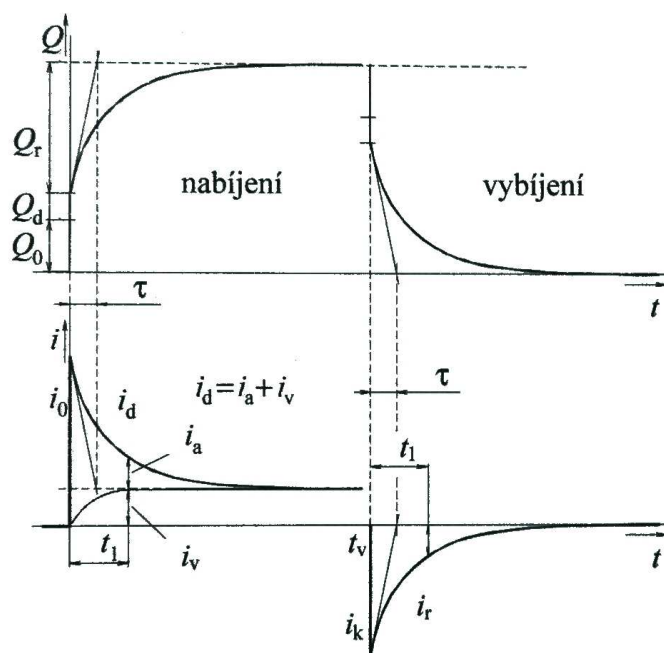
i_a - absorpční proud [μA]

Q_s - je náboj Q_r v ustáleném stavu [C]

C_p - přírůstek kapacity kondenzátoru vlivem relaxačních polarizací [F]

U - napětí [V]

- **Vodivostní proud i_v** - jeho příčinou je elektrická vodivost izolantu vlivem volných nositelů elektrického náboje při působení elektrického pole. U materiálů s dobrým izolačním stavem je proud minimální a časově nezávislý. Naopak u materiálů porušených či navlhčích se musí počítat s časovou závislostí proudu.
- **Vybíjecí proud i_k** - rychle odeznívá po odpojení kondenzátoru, představuje kapacitní složku kondenzátoru.
- **Resorpční proud i_r** - je časově proměnný proud, který se asymptoticky blíží k nule. Již zde nejde o vybíjení stejného náboje jakož byl získán nabíjením, ale o náboj, který je snížen o svodové povrchové cesty v izolaci.



Obr. 3.7. Časový průběh náboje a proudu při nabíjení a vybíjení, převzato z [8]

Časové změny proudu při nabíjení hodnotí lépe polarizační p_i index pomocí čísel, než principy využívající integrování plochy pod křivkou absorpčního proudu.

Polarizační index definuje podíl proudů u elektrických strojů po 60 sekundách a po 600 sekundách po přiložení napětí na izolaci.

$$p_i = \frac{i_{60}}{i_{600}} \quad ,\text{převzato z [8]}$$

U složitých izolačních systémů, kdy je izolant pod napětím jen krátkou dobu, se měření provádí po 2,5 a 10 minutách a izolační materiál se charakterizuje časovou závislostí odporů.

$$p_i = \frac{R_{i600}}{R_{i60}} \quad ,\text{převzato z [8]}$$

Takto určený činitel polarizace při 20 °C udává stupeň vysušení izolace (viz tab.3.4)

Polarizační index p_i	Stav izolace
3-6	Kvalitní suchá a čistá izolace
Okolo 1	Vlhká izolace

Tab.3.4 Hodnocení stavu izolace pomocí činitele polarizace

Činitel polarizace určuje stav izolace, zda se jedná o navlhnutí či znečištění povrchu, nikoliv kvalitu izolace.

3.5 Důležité charakteristické vlastnosti izolaŤtů

Charakteristické vlastnosti jsou velice důležité pro použití izolaŤtů v elektrických zařizích. Mezi tyto vlastnosti řadíme:

- Měrný elektrický a izolační odpor
- Dielektrické ztráty
- Elektrická pevnost
- **Měrný elektrický a izolační odpor** - reálné izolaŤty v nepatrné míře obsahují malé množství nábojů schopných vést při působení elektrického pole elektrický proud, a mají měrnou elektrickou vodivost γ a měrný elektrický odpor ρ . Měrný znamená, že je vztažen na jednotku objemu, přepočítaný odpor ρ či vodivost γ je možné mezi sebou a materiály navzájem porovnávat. Platí vztah:

$$\gamma = \frac{1}{\rho} [\text{S} \cdot \text{m}^{-1}] \quad , \text{převzato z [8]}$$

$$\gamma \leq 10^{-9} [\text{S} \cdot \text{m}^{-1}]$$

$$\rho = 10^8 \text{ až } 10^{20} [\Omega \cdot \text{m}]$$

U elektrických strojů musí mít vinutí proti sobě a proti kostře izolační odpor. Je to přímo určená okamžitá hodnota, která se ale mění v závislosti na provozních podmínkách a okolním prostředí. Je určená minimální hodnota izolačního odporu, která musí být v teplém stavu R_{iz} a ve studeném stavu $5 R_{iz}$. Platí vztah:

$$\text{Kde:} \quad R_{iz} = \frac{U}{0,01P + 1000} \quad , \text{převzato z [7]}$$

R_{iz} - izolační odpor [M Ω]

U - jmenovité napětí stroje [V]

P - jmenovitý výkon [kW]

- **Dielektrické ztráty** - dielektrické ztráty jsou důležité vlastnosti izolantu z hlediska jejich použitelnosti. Je rozhodující, kolik elektrické energie se v izolantu ztratí v důsledku odehrávajících se dějů v jeho struktuře. Tato energie se přeměňuje v teplo, které zhoršuje funkční vlastnosti izolantu a to je nežádoucí. Vznik těchto ztrát se různí podle druhu, struktury a vlastností izolantu, jsou to vodivostní ztráty a ztráty relaxačními polarizacemi, u materiálů, které mají ve svém objemu vyplněny dutinky plynem vznikají ztráty částečnými výboji. Se ztrátou energie jsou svázány i migrační polarizace, při kterém se vytváří nežádoucí prostorový náboj, který se rozmisťuje s působením elektrického pole a s teplotou. Ve stejnosměrném poli jsou dány vodivostí materiálu a tím vznikají Jouleovy ztráty P_Z .

$$P_Z = R_i \cdot I^2 = \frac{U^2}{R_i} \quad ,\text{převzato z [8]}$$

Kde:

R_i - je izolační odpor dielektrika v $[\Omega]$

U - je přiložené napětí $[V]$

I - je hodnota proudu procházející izolantem $[A]$

Ve střídavém elektrickém poli platí, že ztráty jsou zde větší než v poli stejnosměrném a výrazně se zde projevuje veličina ztrátový činitel $\tan \delta$. Ztrátový činitel $\tan \delta$ je bezrozměrná materiálová veličina vyjadřující velikost ztrát energie v izolantu vlivem ztrát vzniklých vodivostí. Polarizace dielektrika závisí též na vnitřní stavbě izolantu na koncentraci nábojů na kmtočtu a na teplotě. Tangenta ztrátového úhlu je doplňkovým úhlem k fázovému posuvu mezi připojeným napětím a proudem v izolantu. Výsledný ztrátový výkon P_Z je dán za předpokladů, že působí sinusové napětí, nepůsobí rušivé cesty a permitivita ϵ je konstantní:

$$P_Z = \omega \cdot C \cdot U^2 \cdot \tan \delta \quad ,\text{převzato z [8]}$$

$$\tan \delta = \frac{1}{\omega \cdot C \cdot R} \quad ,\text{převzato z [8]}$$

Kde:

ω - úhlová rychlost $[\text{rads}^{-1}]$

C - kapacita kondenzátoru $[F]$

R - ohmický odpor $[\Omega]$

Dobré izolanty používané v elektrotechnice mají $\tan \delta < 10^{-3}$, horší $\tan \delta > 10^{-2}$.

- **Elektrická pevnost** - elektrická pevnost je veličina, která nachází praktické využití při navrhování a konstrukci elektrických zařízení. Izolant si zachovává svoje izolační vlastnosti jen do určité hodnoty elektrického pole na něj působícího, po dosažení určité kritické intenzity pole odpor izolantu klesá na hodnotu vodivých materiálů a dochází k průrazu izolantu a vytvoření vodivých cest. Pokud nejmenší napětí, při kterém může nastat průraz přepočítáme na tloušťku izolantu d v místě průrazu, získáme hodnotu elektrické pevnosti E_p .

Vztah pro výpočet elektrické pevnosti je následující:

$$E_p = \frac{U_p}{d} \quad , \text{převzato z [8]}$$

Kde:

E_p - je elektrická pevnost [Vm^{-1}]

U_p - průrazné napětí [V]

d - tloušťka izolace [m]

Elektrická pevnost je závislá a ovlivněná mnoha činiteli, jako např. okolním tlakem, teplotou, vlhkostí prostředí, působícím napětím a také ji ovlivňují vnitřní činitelé, ke kterým patří struktura izolantu, obsah nečistot, míra navlhnutí, polarizovatelnost.

- **Tabulka** - dielektrických vlastností vybraných materiálů používaných pro elektrické stroje

Materiál	ϵ_r [-]	E_p [kV/mm]	$\text{tg } \delta$ [-]	σ [$\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$]	Použití
Vzduch	1,0006	2-3	10^{-6}	10^{-4}	Vzduchová izolace
Celulóza	6,5-7	35-60	0,005-0,01	10^{-10}	Papírové a text. izolace
Steatit	7	25	10^{-5}	10^{-12} - 10^{-13}	Podpěrné izolátory
Slída	5-7	40-60	$(1-3)\cdot 10^{-5}$	10^{-13} - 10^{-14}	Mikanit, mikafólie
Epox. pryskyřice	3,5-4	25	0,01	10^{-14}	Laky, zalévací hmoty

Tab.3.5 Vlastnosti vybraných materiálů, převzato z [20]

4. PROVEDENÍ IZOLAČNÍHO SYSTÉMU

Správná volba izolačních materiálů a technologických postupů je důležitá pro následné použití v elektrickém stroji, má vliv na celý izolační systém stroje a tím i na jeho výkon, zatěžování, ale i na předcházení poruchovosti vlivem nepříznivých vlivů a degradačních činitelů.

Dle normy ČSN EN 60505 Hodnocení a třídění elektroizolačních systémů je elektroizolační systém (EIS)- izolační struktura obsahující jeden nebo více elektroizolačních materiálů (EIM) spolu s přidruženými vodivými částmi, použita v elektrotechnickém zařízení.

Elektroizolační materiál (EIM) –materiál se zanedbatelně nízkou elektrickou vodivostí, používaný pro oddělení vodivých částí s různými elektrickými potenciály.

Stěžejní částí izolačního systému elektrických strojů je izolace vinutí. Izolovaný vodič je při zhotovování vinutí vystavován určitým nástrahám, např. při vkládání vinutí do drážek rotoru a následným působení odstředivých sil, elektrického pole, vlhkosti pracovního prostředí, prachu a především teplotě. Na izolanty jsou kladeny nemalé nároky v podobě velké elektrické pevnosti, dobré tepelné vodivosti a stálosti, odolnosti vůči mechanickému namáhání. Neexistuje jediný izolant, který by splňoval a zajišťoval odolnost vůči všem vlivům, proto se používají různé kombinace materiálů v různých částech strojů a navzájem se doplňují.

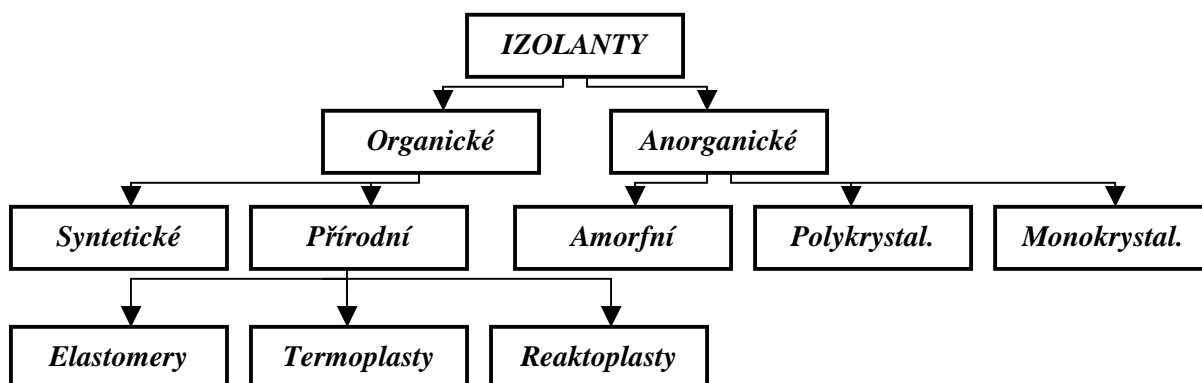
4.1. Teplotní třídy

Při provozu elektrického stroje vznikají vždy určité ztráty, tyto ztráty se přeměňují ve formě tepla, a tím působí na izolační materiály. Malá teplotní odolnost izolačních materiálů oproti kovům omezuje využitelnost stroje. Vedle důležitých charakteristických vlastností izolačních materiálů, jakož jsou měrný elektrický odpor a izolační odpor, dielektrické ztráty a elektrická pevnost je důležitá tepelná odolnost izolačních materiálů. Proto se teplota stala základním měřítkem pro třídění izolačních materiálů. Zařazování materiálů do teplotních tříd je doporučeno normou ČSN EN 60085. Teplotní třídou je označena nejvyšší teplota ve stupních Celsia, pro kterou je elektroizolační materiál vhodný. Relativní index tepelné odolnosti (RTE)- číselná hodnota ve stupních Celsia, při které má materiál po dobu svého života ještě dobré vlastnosti ve srovnání se známým standardním materiálem. V izolačním systému je použito více materiálů, proto je výsledná teplotní třída výslednicí a průnikem jednotlivých teplotních tříd různých použitých materiálů. Tabulka teplotních tříd a RTE (viz tab.4.1)

RTE	Tepelná třída	Předchozí značení
< 90	70	
> 90 – 105	90	Y
> 105 – 120	105	A
> 120 – 130	120	E
> 130 – 155	130	B
> 155 – 180	155	F
> 180 – 200	180	H
> 200 – 220	200	
> 220 – 250	220	
> 250	250	

Tab.4.1 Teplotní klasifikace izolačních materiálů, převzato z [8]

4.1.1 Rozdělení používaných tuhých izolantů a zařazení do teplotních tříd



Obr. 4.1 Rozdělení pevných izolantů , převzato z [8]

Zařazování materiálů do teplotní třídy je velice obtížné, neboť je velmi problematické na základě jaké zkoušky materiál zařadit. Nejlepší by bylo prověřovat životnost materiálu dlouhodobými zkouškami ve skutečném prostředí a podmínkách, to však z ekonomických a časových důvodů není možné. V praxi se pro materiál používají urychlovací zkoušky, při nichž se při různých teplotách materiál sleduje až k dosažení kritéria zestárnutí. Tak se získávají podklady pro životnost materiálů a lze usoudit jeho teplotní odolnost. (viz tab.4.2). Proto se izolanty podrobují neustálému výzkumu sledování a zdokonalování.

Tepelná třída	Izolační materiály
70	Organické materiály- papír, leslá lepenka, dřevo, bavlna- materiály jsou bez impregnace a dalších úprav. V elektrických zařízeních se nepoužívají.
90	Organické materiály- papír, leslá lepenka, dřevo, bavlna- materiály jsou impregnovány-šlakem, asfaltem, oleji. PVC-izolace vodičů
105	Organické látky přírodní i syntetické—s impregnantem nebo lakem, Syntetika na bázi celulózy, lepenka drážková, lakovaná polyesterová tkanina- nízkonapěťové motory
120	Celulózový a tvrzený papír, tvrzená tkanina s fenolformaldehydovou nebo fenolická pryskyřicí, PET folie a eltech. lepenka-drážková izolace nízkonapěťové stroje
130	Anorganické materiály-skleněná vlákna, sulfátový papír s pojivem, skleněný laminát s epoxidovým pojivem, pásy PET/kaučuk, PET/akrylát-mechanicky namáhané izolace
155	Skleněná vlákna, slídový papír, PET fólie, aramidový papír, epoxidové a novolakové pryskyřice, kompozitní materiály, rekonstruovaná slída, Nomex-Stroje a přístroje
180	Aramid polyimidy, polyester, slída, slídový papír, pojiva jsou: silikonová pryskyřice a modifikovaná epoxidová pryskyřice, Nomex-vysoce teplotně namáhané motory
200	Sklo, aramidové papíry se silikonovými pojivy. Impregnační lak na bázi polyesteralkydů-silikonová zalévací hmota zabraňuje vibracím a hluku
220	Sklo ve formě vláken, aramidové papíry, silikonová pojiva-Drážkové izolace, izolace přívodů a spojů, lak na bázi polyesteralkydů-izolace vodičů a cívek
250	Polyamidy Kapton, aramid Nomex, PTFE- polyuretatetrafluoretylen, slída a slídový papír, polyimidová fólie pro vysokonapěťové systémy
	Speciální aplikace mimo teplotní třídy-keramické izolanty, polyimidy až 450 °C, fólie sklo hliník pro až 500 °C

Tab.4.2 Zařazení izolantů do teplotních tříd, převzato z [8]

Při navrhování elektrického stroje hraje velkou roli zvolení materiálu v určité teplotní třídě, neboť ovlivňuje velikost stroje, životnost, spolehlivost, výkon i zatěžování. Je běžné, že u strojů pro zvláštní použití do těžkých podmínek se izolace volí v třídě F, ale stroj je počítán pro třídu B. Stroj je spolehlivý, ale na úkor ceny. Normy předepisují omezení teploty pro jednotlivé části elektrických strojů, podle toho je možné izolace volit.

Pouze zvolený materiál nestačí k tomu, aby měl izolační systém požadované parametry, proto se na konečných vlastnostech izolačního systému podílí technologie zpracování.

4.2 Technologie izolačních systémů elektrických strojů

Spolu se zvoleným materiálem se na konečných vlastnostech izolačního systému podílí technologie zpracování. V současné době se používají technologie pro: Nízkonapěťové izolační systémy točivých elektrických strojů a pro Vysokonapěťové izolační systémy točivých elektrických strojů.

4.2.1 Nízkonapěťové izolační systémy točivých elektrických strojů

Technologie týkající se nízkonapěťových izolačních systémů jsou použity u většiny elektrických strojů a u trakčních zařízení do 1000 V. Izolační systémy jsou tvořeny izolací vodičů ať už umístěných v drážkách nebo navinutých na jádře pólů, cívkovou izolací, drážkovou izolací a především impregnantem, který spolu s použitým materiálem zajistí konečnou kvalitu izolace.

- **Izolace vodičů** - závisí na výšce pracovního napětí a účelu použití v daném stroji. Izolace je buď lakovaná nebo provedena ovinutím pevné či nanášené izolace. Vodiče pravoúhlého průřezu se značí následovně: xxxx yxy-y yxy –označuje výšku a šířku vodiče, y- jmenovitý přírůstek izolace
- první pozice označuje zda se jedná o: L-lakovaný drát nebo O-vodič pro vinutí
- druhá pozice určuje zda se jedná o: L-měď nebo A-hliník
- třetí pozice charakterizuje materiál izolace (viz tab.4.3).

B	Bavlněná příze
H	Hedvábná příze
K	Skleněná příze
A	Polyamidové hedvábí
E	PET fólie
G	Slídová páska
L	Elektroizolační lak
I	Polyesterimidový lak
M	Polyimidový lak
T	Tereftalátový lak
S	Silikonový lak
U	Polyuretanový lak
P	Neimpregnovaný papír

Tab.4.3 Materiál izolace vodičů, převzato z [8]

- čtvrtá pozice má zvláštní označení N-několikanásobné ovinutí, A-zvláštní provedení.

- **Vyložení drážky** - chrání vodiče vinutí před poškozením o stěnu drážky, provádí se z drážkové lepenky, kombinované drážkové izolace nebo *Nomexu*®.
- **Impregnace** - vinutí elektrických strojů je třeba chránit před nepříznivými vlivy prostředí, např. vlhkost, prach, nečistoty a mechanicky je zpevnit dobrou impregnací. Impregnační hmota vyplňuje prázdná místa mezi izolací a slepuje vodiče k sobě, tím zvyšuje a udržuje elektrickou pevnost a zlepšuje tepelnou vodivost izolace.

Impregnační metody:

- **Máčením** - po vytažení vinutí ze sušící komory, kde se vinutí zbavuje vlhkosti se ochladí na 50°C a ponoří se do nádrže s impregnantem. Dokud se objevují na povrchu bublinky tak se nechá ponořené. Následuje odkapávání a vytvrzování. Pro máčení se používají jednosložkové polyesterové pryskyřice, použitelné pro teplotní třídu 180.
- **Vakuově tlakově** - předměty k impregnaci se předsušují ohřátým vzduchem za normálního tlaku. Po ohřátí na žádanou teplotu jsou sušeny pod tlakem vyvolaným vývěvou, mezitím se v chladiči vysráží voda. Při impregnaci je teplota okolo 50 °C a pomale se napouští impregnant až do zcela zaplavení vinutí, potom probíhá vyrovnávání tlaku až na atmosférický. Pro rychlé odpaření rozpouštědel se tlak opět snižuje, následuje odkapávání a vytvrzování za normálního tlaku vzduchu.
- **Zakapáváním** - vinutí se zahřívá procházejícím proudem, tím se udržuje konstantní teplota a do něj se po kapkách dostává impregnant. Za rotace vinutí stéká impregnant na čelo vinutí až do doby, než vytvoří na povrchu souvislou vrstvu, pak se vinutí otáčí ve vodorovné poloze a zakapává se opačné čelo. Pro vytvrzení epoxidové, polyesterové nebo nenasycené polyesterimidové pryskyřice se za stálého otáčení a působícího proudu udržuje teplota 120 -150°C. Tato metoda je používána pro teplotní třídu 155 (F) nejrozšířenější u elektrických strojů.
- **Povrchová úprava impregnovaného vinutí** - používána pro dosažení co největší hladkosti povrchu impregnovaných vinutí, z důvodů zkvalitnění izolace vinutí. Ochranné látky se nanášejí nejčastěji stříkáním, poléváním, máčením nebo nátěrem elektroizolačním lakem používaným v opravárenství elektrických strojů.

4.2.2 Vysokonapěťové izolační systémy točivých elektrických strojů

Vysokonapěťové systémy točivých elektrických strojů jsou vyráběny dvojí technologií. Každá z metod je specifická a má svoje výhody i nevýhody. Technologie resin-rich - se dá pojmut jako obsahující pryskyřici a technologie VPI - znamená vakuová impregnace. Hlavními výhodami izolačních systémů vyrobených těmito technologiemi jsou výborné dielektrické vlastnosti ve všech požadovaných směrech (elektrická pevnost, ztrátový činitel, malá elektrická vodivost), tepelné i mechanické vlastnosti a výborná odolnost vůči stárnutí. Tyto výhody jsou bohužel vyváženy velmi vysokou náročností na technologickou dokonalost a náročné na technické vybavení výrobního závodu. Proto se technologie promítají do ceny.

- **Systém resin-rich** - systém je založen na tříložkovém kompozitu se základním izolačním předimpregnovaným materiálem, který je ve formě polotovaru s 30 až 40 % pojiva. Materiál je zpracován tak, že na vodivé části, která je základem se vytvoří izolační kompaktní trubka o určité tloušťce stěny. Takto připravená část vinutí se vkládá přímo do drážek stroje, kde se jen pospojují čela vinutí. Vzhledem k tomu, že montáž izolovaných trubek je prováděna až po vytvrzení a izolační systém neznemožní rozebrání vinutí, je možno při této technologii provádět opravy. Základem pro materiál jsou tři složky: nosnou část tvoří *skleněná tkanina*, jejíž vlákna jsou 0,12 mm. Izolační bariéru tvoří *kalcinovaný slídový papír*, který je hutný, pevný a málo nasáklý. Pojivem pro obě složky je reaktoplastická bezrozpouštědlová novolaková nebo cykloalifatická epoxidová pryskyřice. Materiál se dodává v předtvrzeném stavu tloušťky okolo 0,2 mm. Na připravený základ vinutí se nanáší potřebná vrstva v závislosti na pracovním napětí stroje a to dvěma způsoby:

Kontinuální způsob - navinutí materiálu ve formě pásy šířky kolem 20 mm s polovičním, třetinovým nebo dvoutřetinovým překrytím po celé délce tyče včetně čel.

Diskontinuální způsob - rovná část vinutí je tvořena fóliovým materiálem, na který navazuje v čelech ovin již zmiňovanou páskou.

V obou případech se materiálu vždy přidá z důvodů stlačení ve formě. Samotné vytvrzení probíhá ve formě umožňující stlačení a zahřátí izolace až na teplotu gelace (přibližně 90°C, tato teplota nesmí být překročena, protože by mohlo dojít k úplnému vytvrzení a nebylo by možné provést dotáhnutí formy.) Po ohřátí je nutno formu dotáhnout a dále ohřát až na vytvrzovací teplotu, která je 160 až 170°C. V závislosti na použitém materiálu a velikosti výrobku je nutno na vytvrzovací teplotě setrvat po určitou dobu. Po uplynutí určitého času se pomalu s přestávkou snižuje teplota, až se nechá forma samovolně vychladnout na teplotu okolí. Tím je proces vytvrzení izolačního systému u konce a hotová trubka se může vyjmout z formy a zakládat do drážek.

- **Systém VPI** - základním materiálem tohoto systému, tedy vakuově tlakové impregnace je savá slídová páska, která se při impregnačním procesu prosytí impregnantem. Tato metoda je vhodná pro trakční motory, s pevným vinutím s výbornými tepelnými i izolačními vlastnostmi. Izolační páska se opět skládá ze tří komponent: základní je nosná *skleněná tkanina*, *polyesterové rouno* nebo *polyimidová fólie*. Pojivo je jen okolo 7 %, pro mechanické zajištění. Savost materiálu je důležitá k proimpregnování 10 i více vrstev. Vinutí se zakládá do stroje před impregnací, tudíž se celé zařízení impregnuje najednou a je prakticky neopravitelné. Impregnantem bývají bezrozpouštědlové epoxidové, polyesterové a silikonové pryskyřice se 100 % obsahem sušiny, což umožňuje vyplnit prostor impregnovaného objektu. Pryskyřice mají dobré elektrické i mechanické vlastnosti i krátkou vytvrzovací dobu. Zařízení pro impregnaci je sestaveno z vakuotěsného kotle vybaveného ohřívacím a chladícím zařízením a ze zásobníku impregnantu.

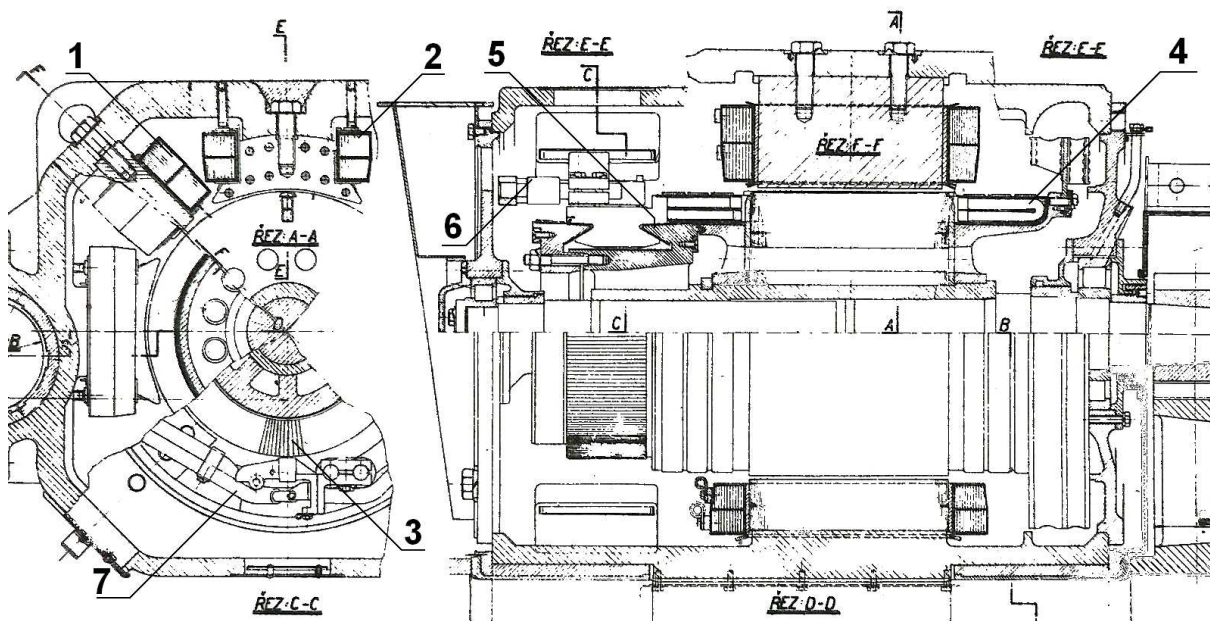
Vlastní impregnační proces VPI

Zpracované izolované vinutí je nutno nejdříve dokonale vysušit a zbavit vlhkosti. Vysušení se provádí v sušárně při teplotě 100°C po dobu minimálně 20 hodin. Po vysušení se výrobek zaveze do impregnačního kotle, kde je ve vakuu (100Pa) opět vysušován kvůli odstranění zbytku těkavin a vlhkostí, následně se napustí impregnantem, který ve vakuu zaplaví vysušené, zahřáté a odplyněné vinutí. Pro úspěšné provedení impregnace je v impregnačním kotli zvýšen tlak. Po vypuštění laku se stroj suší nejprve v mírném podtlaku pro vyprchání těkavých složek, poté vytvrzení probíhá teplým vzduchem za normálního tlaku.

- **Porovnání jednotlivých technologií** - pro technologii VPI je nutná potřeba poměrně náročného a drahého technického zařízení. Metoda *resin-rich* zase potřebuje přesné přípravky pro vytvrzování. Technologie VPI je náročnější na technické vybavení, zejména u velkých strojů, ale z hlediska homogenosti izolace je lepší než u systému *resin - rich*, kde k těmto nehomogenitám dochází, ale je možné kdykoliv část vinutí vyjmout a vyměnit nebo opravit. Technologie VPI je celá v jednom kompaktu a možnost oprav prakticky neumožňuje, ale díky této technologii je větší úspora izolačního materiálu. Každá technologie má svá pro a proti, proto je nutné volbu technologie dobře rozmyslet. Tyto výhody jsou bohužel vyváženy velmi vysokou náročností na technologickou dokonalost a technické vybavení výrobního závodu. Technologie promítají do ceny, proto se u strojů běžného používání a motorů pro trakci používají méně náročné technologie máčením a zakapáváním. S rostoucí potřebou spolehlivosti, výkonu a dielektrických vlastností spolu se zvyšováním tepelné třídy u trakčních motorů např. na 180 nebo 220, se již přiklání k zmíněným metodám VPI a *resin-rich*.

4.3 Provedení izolačního systému trakčního motoru

Každý izolační systém stroje představuje soustavu izolačních materiálů s různým technologickým zpracováním, pro specifické použití na určeném místě nebo části stroje. U stejnosměrného trakčního elektromotoru jsou tyto části (viz obr.4.2), tvořící izolační systém.



Obr. 4.2 Podélný a příčný řez trakčním motorem, převzato z [6]

- Kde: **na statoru:** (1) - pomocný pól
(2) - hlavní budící pól
- na rotoru:** (3) - drážka pro uložení vinutí rotoru
(4) - profilový vodič rotoru
(5) - komutátor- místo pro připojení rotorových cívek
- na štítu:** (6) - izolátory pro připevnění držáků kartáčů
(7) - kabely pro propojení kartáčových držáků

4.3.1 Provedení trakčního motoru v třídě 130 (B)

Provedení trakčního stejnosměrného elektromotoru v teplotní třídě 130 (B) jsem zařadil jen pro názornou ukázkou. Proto, aby bylo zřetelné jak se s postupem času a s rostoucími požadavky izolační systém vyvíjel, jaké materiály se používaly před současným izolačním systémem ve třídě 155 (F).

Ve většině případech byly použity anorganické izolanty na bázi skla a azbestu.

- **Provedení budících a pomocných cívek** - izolace je složena z mezizávitové a zevní izolace cívek.
- **mezizávitová izolace** - jednotlivé cívky byly tvořeny *vetroazbestovou* izolací a *termosetickým* lakem.
- **zevní izolace** - tvořila ji *skloslídová páska* ovinutá *skleněnou tkanicí*.

Budící vinutí bylo pospojováno kabely se *svitprenovou* izolací a pomocné vinutí měděnými pásy se skelným ovinutím.

- **Provedení izolace rotorového vinutí** - mezizávitová i cívková izolace je doplněna drážkovou izolací:
- **mezizávitové izolace** - byly provedeny *skloslídovou* nebo *azbestovou páskou* lepenou *termosetickým* lakem, v délce drážek bylo vinutí olisováno *mikafóliemi* nebo se přímo mezi závitů vkládal *mikanit* ve formě tenkých pásek.
- **cívková izolace** - provedena *skloslídovou* páskou, která byla ovinuta skleněnou tkanicí nebo ožehlena *mikafóliemi* v rozmezí 0,8-2 mm v závislosti na napětí.
- **drážková izolace** - prováděly se jako dnes ve třech vrstvách z nichž nejkvalitnější vrstva je uložena doprostřed. Provedení izolace bylo následovné: *leatheroid*, *skleněné vlákno* a *slídový papír*. Na dno drážky, pod klín a mezi cívkové plochy se umísťovaly pásy z lesklé lepenky tloušťky 0,5-2mm.
- **Izolátory pro připevnění držáků kartáčů** - izolaci roubíků proti kostře tvoří trubka z tvrzené tkaniny, která je překryta ocelovým pouzdrem kvůli zachování pevnosti. Roubíky jsou ještě překryty *porcelánovými* izolátory.

Mnoho z uvedených materiálů bylo postupně nahrazeno kvalitnějšími, např. azbest se objevil ve třídě 155 (F), ale ze zdravotního hlediska byl zakázán. Některé materiály třeba jen na základě stejné báze se používají i v dnešních izolačních systémech.

4.3.2 Provedení izolačního systému trakčního motoru ve třídě 155 (F)

Izolační systém stejnosměrných elektromotorů v teplotní třídě 155 (F) je v současné době nejrozšířenější. S přibývajícími nároky, nově vyvinutými materiály a technologiemi trakční motor nemusí být omezován škálou již nedostačujících materiálů a může se použít jiných kvalitnějších a zcela dostačujících materiálů třeba i ve vyšší teplotní třídě, např. 180 (H). Díky tomu je i teplotní třída 155 (F) u trakčních elektromotorů na ústupu.

Pro izolaci třídy F jsou použity speciální anorganické izolanty.

➤ **Provedení budících a komutačních cívek** - izolace je ve dvou provedeních:

- **mezizávitová izolace** - izolace se provede výjimečně páskou *skloazbestovou*, používá se především *sklolaminátová páska s termoseťovým lakem*.
- **zevní izolace** - provedena *skleněnou tkanicí*.

Statorové cívky jsou propojeny kabely se *silikonkaučukovou* izolací, nověji spolu s komutačními cívkami jsou spojeny měděnými pásy izolovanými *remikapáskou*.

➤ **Provedení izolace rotorového vinutí** - s mezizávitovou a cívkovou izolací se provádí drážková izolace:

- **mezizávitové izolace** - cívky z *dynamopásů* jsou izolovány *skloremikafóliem* resp. *semikathermem*. V délce drážek je vinutí ošetřeno *remikafólií*.
- **cívková izolace** - cívka je ovinuta epoflexovou páskou nebo skelnou tkanicí.
- **drážková izolace** - prováděla se jako dnes ve třech vrstvách, z nichž nejkvalitnější vrstva se dávala doprostřed. Používala se *lesklá lepenka, mikafólium a remikafólie*.
- **komutátorová izolace** - lamely komutátoru z komutátorové mědi s přísadou stříbra jsou proloženy mikanitovou izolací a sevřeny stahovacím prstencem. Bandáže rotorového vinutí jsou ocelové, pájené, případně mohou být *sklolaminátové*.

K izolačnímu systému, který je neméně důležitý jako všechny ostatní, řadíme i izolaci roubíků, které jsou umístěny na štítu a nesou držáky kartáčů.

➤ **Izolátory pro připevnění držáků kartáčů** - izolaci roubíků proti kostře tvoří trubka z tvrzené tkaniny, která je překryta ocelovým pouzdem kvůli zachování pevnosti. Roubíky jsou překryty *steatitovými* nebo *kordieritovými* izolátory.

4.4 Nově navržený izolační systém pro trakční motor

Nejen v důsledku teplotního znehodnocování izolačního systému je u trakčních stejnosměrných elektromotorů vyšší poruchovost, především u rotorů a v menší míře i u statorů. Poruchovost není dána jen teplotním znehodnocováním, ale ovlivněna i faktory např. komutací či okolním prostředím. Díky nově navrženému izolačnímu systému, který má odolnější izolační materiály a je odolnější především teplotně, můžeme těmto poruchám předejít. Dalším poruchám předejdeme např. správným nastavením kartáčů do neutrální osy nebo správnou údržbou elektromotoru.

Proto jsem se rozhodl, že poruchám způsobeným teplotním znehodnocováním se pokusím předejít nově navrženým izolačním systémem s použitím soudobých elektroizolačních materiálů a technologií vhodných pro provoz v daných podmínkách.

- **Současné materiály používané ve třídě 155 (F)** - skleněná vlákna, PET, PEN fólie, aramidový papír, epoxidové a novolakové pryskyřice. Dále kompozitní materiály na bázi skleněné tkaniny s epoxidovým pojivem, s pojivy na bázi modifikovaných polyesterů. Vysokonapěťové systémy využívají skleněnou tkaninu, PET, PEN fólie, rekonstruovanou slídu a pojiva epoxidové a polyesterové pryskyřice. Epoxidové pryskyřice na bázi bifenolu pro impregnování vinutí technologií VPI. Izolační systém na bázi slídového papíru, skleněných vláken a Nomexu[®] pro izolování vinutí motoru.
- **Současné materiály používané ve třídě 180 (H)** - aramidy, polyimidy, slída, slídový papír. Jako pojivo se používá silikonová pryskyřice a modifikovaná epoxidová pryskyřice. Kompozitní materiály na bázi slídového papíru, skleněné tkaniny a pružných silikonových elastomerů slouží pro izolaci vodičů, mezizávitovou izolaci i izolaci pro vysokonapěťové stroje. Materiál na bázi Nomexu[®] a polyesterové folie slouží pro drážkové izolace středních motorů. Kalcinovaný slídový papír, epoxidová pryskyřice a polyimidová folie slouží pro vysoce teplotně namáhaná vinutí motorů. Na drážkovou izolaci lze použít kalandrovaný papír Nomex[®] s modifikovanou pryskyřicí.

Vzhledem k současnému trendu používání slídy, slídových výrobků a technologií *resin-rich* nebo VPI pro vynikající dielektrické a mechanické vlastnosti bych volil kombinaci materiálů vhodných pro daný účel. Materiály vhodné k již zmiňovaným technologiím jakož jsou slídový papír, v němž je slída ve formě malých částic a tím zachovává její základní vlastnosti. Název nese podle továrny vzniku: Remika[®], Calmika[®], Samika[®], Elmika[®], atd.

Slída, která se vyskytuje v přírodě jako uhlí nebo uran, je surovina, která vykazuje vynikající dielektrické, tepelné a fyzikální vlastnosti. Tepelným, chemickým a mechanickým působením se vyrobí kašovina, podobná papírové, po dalším zpracování se ze slídy (*Mica*) vyrobí světově známý slídový papír Samica[®], Elmica[®] nebo Remika[®].

Při zpracování na elektrotechnické izolační materiály jako jsou pásy, fólie nebo desky se slídový papír kombinuje s nejrůznějšími nosnými materiály, aby byla dosažena mechanická pevnost.

4.4.1 Stator trakčního elektromotoru

Stator elektromotoru není mechanicky namáhanou částí jako rotor, proto se může použít materiálů, které jsou jen dostatečně tepelně odolné. Rozdíl mezi budícím vinutím a pomocným vinutím je v provedení a navinutí na šabloně. Izolační materiál, použitý vodič i technologie zpracování mohou být naprosto stejné.

- **Nově provedený izolační systém a postup při jeho zhotovení** - jestliže bych měl navrhnout úplně nový izolační systém cívek, který splňuje všechny požadavky na spolehlivost a výkon trakčního motoru, použil bych materiály a technologie pro zhotovení izolačního systému –VPI, materiály na bázi slídového papíru *Samica*[®] nebo *Elmica*[®].

Materiály se slídovým papírem *Samica*[®] či *Elmica*[®] jsou impregnovatelné, ohebné termoreaktivní, kompaktní a tepelně odolné izolace pro motory, generátory a vodiče pro vinutí. Slídový papír se kombinuje s nejrůznějšími nosnými materiály, aby byla dosažena mechanická pevnost.

Savé pásky tvoří s bezrozpouštědlovými pryskyřicemi pro technologii VPI hlavní složky izolačních systémů.

- **Vodič** - základem pro nově zvolenou cívkou je měděný profilový vodič *DAMID 2* s 2 krát lakovaným povrchem a povrchově izolovaný pásku *Elmicafol*[®] vhodnou pro izolaci zatížených trakčních motorů. Základem pásky je *slídový papír a polyesterový film* s minimálním obsahem pojiva. Páska je vhodná pro technologii VPI.
- **Navíjení** - navíjení vodiče na předem zvolenou formu pro budící nebo pomocné cívky. Po navinutí se poslední závit přichytí skelnou tkanicí a cívka je nachystaná pro slisování v přípravku, kde po stažení získá konečný tvar.
- **Příprava cívky k impregnaci** - po stažení a slisování cívky na konečný tvar se navaří svorky pro připojení propojek. Svorky vývodů z cívky, se na předním čele cívky navařují tvrdou pájkou, pomocí Ag25Sn nebo Ag45Sn. Celá cívka se s navařenými spoji ovine savou páskou *Samicapor*[®], určenou pro ovin trakčních cívek a vhodnou k technologii VPI. Takto připravená cívka je nachystaná k impregnaci *impregnační epoxidovou pryskyřicí 74041*, metodou VPI popsané v kapitole 4.2. Technologie izolačních systémů elektrických strojů.
- **Zhotovení pólu trakčního motoru** - naimpregnovaná a nalakovaná cívka povrchovým lakem je nachystaná pro připevnění na pólový nástavec. Pólový nástavec je nutno izolovat, aby se nepoškodila izolace cívky. Na nástavec se nažehlí páska *Elmicafol*[®] 315.21-11. Nyní se cívka nalepí *epoxidovým dvousložkovým lakem* k pólu. Případné nerovnosti mezi cívkou a pólem se eliminují *epoxidovými tmely*, např. 4318. Nyní je pólová cívka nachystaná do motoru.

4.4.2 Rotor trakčního elektromotoru

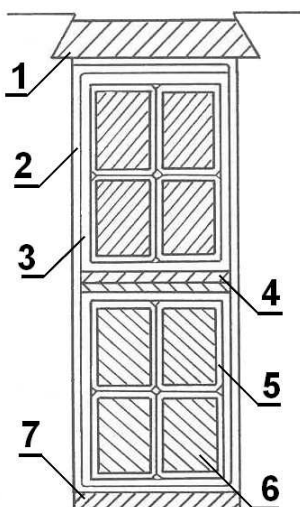
Rotor trakčního motoru, jak bylo již zmiňováno, je mnohem víc namáhanou částí motoru, zejména mechanicky, proto je důležitější věnovat pozornost při výběru izolačních materiálů a technologií, pro drážku, pro vodič v drážce umístěný a pro komutátor. Při návrhu rotoru použijí materiály a technologie využívající izolantů na bázi *slídy*, neboť *slídový papír* kombinovaný s různými nosnými materiály dosahuje velké mechanické pevnosti.

Na obrázku 4.3 je znázorněn rotor stejnosměrného stroje, který má nachystané drážky pro vkládání drážkových izolací a izolované podpěrné kruhy, na nichž bude připravena izolovaná cívka, která bude vložena v izolovaných drážkách a připojena k praporkům komutátoru.



Obr. 4.3 Rotor stejnosměrného stroje

- **Izolační systém drážky rotoru** - systém izolací v drážce slouží k ochraně vinutí rotoru před poškozením o stěny drážky. Izolace musí mít dostatečnou elektrickou i mechanickou pevnost z důvodu odstředivých sil působících při otáčení rotoru, musí být odolný proti otěru i dostatečně kluzký. Dále musí mít vysoký izolační odpor nezávislý na vlhkosti a velkou odolnost vůči chemickým vlivům. Izolační systém drážky se skládá z několika izolací (viz obr. 4.4)

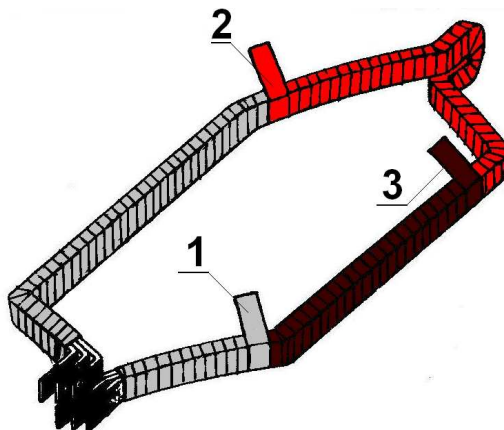


Obr. 4.4 Řez drážkou

- Kde:
- (1) - drážkový klín
 - (2) - vyložení drážky
 - (3) - drážková izolace
 - (4) - mezivložka
 - (5) - izolace vodiče
 - (6) - vodič
 - (7) - vložka na dno drážky

- **vložka na dno drážky** - je vložena na dno drážky, slouží k prvotnímu odizolování od magnetického obvodu. Použijí vrstvený izolant *Myoflex*® *NGN*, který je složen ze tří vrstev: z *Nomex*®/ *skelná tkanina*/ *Nomex*®.
- **vyložení drážky** - drážka je vyložena po celé délce vícevrstevním voděodolným ohebným plošným izolantem *Myoflex*® *NGN* tak, aby na každé straně svazku vyčníval o 15mm.
- **drážková izolace** - jako drážkovou izolaci navrhuji použít plošný vrstvený izolant *Elmica*® 425, který po vložení do drážky přečníval svazek vodičů na každé straně o 15 mm, po ohnutí vyčnívající části slouží materiál jako izolační vložka pod mezivložku a drážkový klín.
- **mezivložka** - po vložení svazku vodičů do spodní části drážky a ohybu vyčnívající drážkové izolace se spodní část drážky uzavře mezivložkou z materiálu *Elmica*® 425.
- **drážkový klín** - slouží k uzavření horní části drážky, která je nad vodičem ukončena ohnutou drážkovou izolací a samotnou izolační vložkou pod klín z materiálu *Myoflex*® *NGN*. Samotný drážkový klín je zhotoven z lichoběžníkového *Skloepoxidu*.
- **izolace podpěrných kruhů** - v místech, kde je vinutí připojeno k praporkům komutátoru a na druhé straně kotvy, kde vystupuje vinutí z drážek je podepřeno podpěrnými izolačními kruhy. Izolace kruhů je provedena z moderního vrstveného materiálu *Izolační okruh 451.12* ze *silikonu*, *skla* a *Samicy*® určeného pro zatížené trakční motory, v teplotní třídě H.

- **Rotorové vinutí** - pro rotorové vinutí trakčních elektromotorů se používá vinutí z vytvarovaných tvrdých cívek, obdélníkového profilu, které se izolují příslušnými izolacemi typickými pro jednotlivé technologie. Pro upevnění vinutí v drážce jsou použity drážkové klíny, k upevnění čelních částí na izolačních podpěrných kruzích se používají bandáže. Pro rotor jsem se rozhodl, že použiji materiály vhodné pro technologie VPI, neboť se hodí pro trakční motory díky homogenosti, úspoře materiálu a díky odolnosti vůči výbojům.

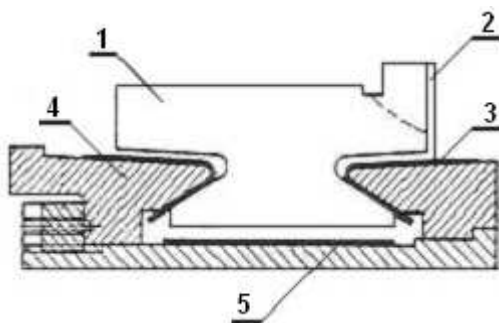


Obr. 4.5 Jednotlivé izolace cívk

- Kde:
- (1) - hlavní izolace vodiče
 - (2) - izolace čel vinutí
 - (3) - drážková izolace vodiče

- **Vodič** - vodič pro rotorové vinutí použiji dva krát lakovaný se slídovou páskou *Elmicafol*[®] určenou pro vysoce zatížené trakční stroje. Skládá se ze slídového papíru *Elmica*[®], který je impregnován epoxidovou pryskyřicí a polyesterového filmu je použito jako materiálu nosiče. *Elmicafol*[®] zároveň tvoří hlavní izolaci rotorového vinutí.
- **Izolace čel vinutí** - volba vhodné izolace čel cívek je nejdůležitější částí při vývoji izolačního systému. Izolace čel cívek musí vydržet namáhání a odolávat vlivům prostředí. Tloušťka izolace čel cívek je obvykle v rozmezí 60 až 100% tloušťky hlavní izolace, proto jsem na izolaci čel vinutí použil izolaci *Samica*[®]*flex 366.19*, vhodnou pro namáhané stroje se *silikonovým elastomerem*, který se navíjí před a po hlavní izolaci a vytvrzuje se teplem.
- **Izolace drážkové části** – na izolaci vodiče v drážkové části jsem použil *Elmicaform*[®], který dodatečně zajišťuje určité spleení poloh, tím uzavírá izolace a slouží k mechanické ochraně vodiče v drážce. Drážková izolace se nažehljuje na impregnovanou rovnou část cívky, teprve potom se cívka vkládá do drážky. Spolu s izolací drážky tvoří drážková izolace nejvyšší možnou ochranu hlavní izolace pracovní části rotorového vinutí.

- **Oviny čel cívek** - po vložení cívek do drážek se musí čela vinutí ještě uchytit k podpěrným izolačním kruhům, k tomu použijeme stahovací skelné tkanice. Oviny čel cívek slouží pro připevnění vinutí k podpěrným izolačním kruhům, čela ovinu *skelnou tkanicí SCST* vhodnou pro tepelnou třídu 180 (H).
- **Izolace bandáže** - bandáž čel vinutí se provede skelnou bandážovací páskou *Polyglas® H 200* složenou z podélných skelných vláken, které jsou impregnovány kvalitní epoxidovou pryskyřicí ve stavu B. Bandáže se vytvrzují teplem. Po vytvrzení bandáží se celý rotor nastříká elektroizolačním lakem.
- **Komutátor** - patří mezi složité a choulostivé části stroje, protože je složen z materiálů s rozdílnými fyzikálními vlastnostmi jsou na něj kladeny přísné výrobní požadavky. Jedním z požadavků je stálost tvaru i v ohřátém stavu, proto se musí volit materiály odpovídající těmto požadavkům. I přesto, že se vyvíjí stále nové a kvalitní izolace, důležitou roli v této oblasti hraje stále štípaná slída. Komutátor s ohledem na předchozí izolační systém stejnosměrného trakčního motoru zůstane bez větších změn.



Obr. 4.6 Izolační systém komutátoru, převzato z [11]

- Kde:
- (1) - lamela
 - (2) - lamelová izolace
 - (3) - izolační manžeta
 - (4) - pouzdro
 - (5) - izolační podložka
- **Lamelová izolace** – se skládá ze slídového papíru *Elmica® 4*, epoxidového pojiva a skelné tkaniny pro vyztužení. Materiál *Elmica® KIFE-A* je zpracovaného do formy tvrdých kompaktních přesných desek.
 - **Izolační manžeta** - slouží k odizolování lamel od pouzdra komutátoru, používá se tvárného *mikanitu* na bázi slídových lístků a *šelakového pojiva*. Materiál je ohebný a tvárný. Díky moderním technologiím se vyrábí materiály na bázi *slídového papíru*. Použil bych materiál *V- kruh 451.15* s dobrou tepelnou odolností a tvarovou stálostí. Stejný materiál použiji i na izolační podložku.

4.4.3 Přehled a popis elektroizolačních materiálů

- **Elmicafol[®]** - je slídová páska určená pro izolaci vodičů. Skládá ze slídového papíru *Elmica[®]*, polyesterového filmu jako materiálu nosiče a malého množství epoxidového pojiva.

Typ materiálu	52801/52801 A		528011/528011A
Plošná hmotnost [g/m ²]	100 + - 10	125 + - 10	143 + - 10
Slídový papír [g/m ²]	50 + - 5	75 + - 5	75 + - 5
Celková tloušťka [mm]	0,07 + - 0,01	0,09 + - 0,01	0,10 + - 0,01
Polyesterový film [g/m ²]	42 + - 3		42 + - 3/14 + - 3
Obsah pojiva [g/m ²]	7 + - 3	9 + - 3	11 + - 3
Těkavost, max. [%]	0,5		
Pevnost v tahu, min. [N/cm]	20		45
Tuhost, max. [N/m]	35		40
Průrazné napětí [kV]	6		7
Teplotní třída	F		
Životnost při [měsíc]			
- 20°C	12		
- 5°C	18		

Tab.4.4 Vlastnosti materiálů, převzato z [27]

- **Samicapor[®] 366.53-01** - se skládá ze slídy a skelné tkaniny a je určen pro trakční cívký, kde je požadovaná vysoká elektrická pevnost. Tloušťka izolace je 0,12 mm.
- **Impregnační epoxidová pryskyřice 74041** - bez rozpouštědel pro technologii máčněním a VPI pro trakční motory v tepelné třídě H. Je to jednosložková pryskyřice s nízkým obsahem těkavých látek, vhodná pro rotory a statory. Je tixotropní, tvoří silnou vrstvu a vhodná pro vakuotlakovou impregnaci VPI.
- **Elmica[®] 425** - je flexibilní lisovaný voděodolný materiál, složený ze dvou nebo i více vrstev slídového papíru a silikonového pojiva. Je vyztužen skelnou tkaninou a PET filmem z obou stran. Používá se jako drážková a mezifázová izolace.

Celková tloušťka [mm]	0,25	0,32	0,35	0,40	0,43	0,45	0,50	0,60
Složení materiálu	Vrstvy phlogopitového slídového papíru/2 vrstvy skelné tkaniny 46 μm/PET 20 μm							
Obsah pojiva [%]	30							
Těkavost [%]	1,5							
Elektrická pevnost min [kV/mm]								
V rovině	24							
V ohybu	-							
Odolnost roztržení [N]								
Průměrná	130							
Minimální	100							

Tab.4.5 Vlastnosti materiálů, převzato z [27]

- **Myoflex® NGN** - se skládá ze tří vrstev: z *Nomex® /skelná tkanina/ Nomex®*. *Myoflex®* je ohebný vícevrstvý izolační materiál, používá se jako drážková a fázová izolace. Je použita pro vyložení drážky i na dno drážky.
- **Izolační kruh 451.12** - složen ze *silikonu, skla a Samicy®* je určen pro vysoce tepelně zatížené trakční motory, v teplotní třídě H.
- **V-kruh 451.15** - je složen ze slídového papíru *Samicy®*, *Nomexu®* a *Epoxidu*. Je určen pro komutátorové manžety a podložky, má dobrou tepelnou odolnost a vynikající tvarovou stálost.
- **Elmicaform®** - je to lisovaný elektroizolační materiál tvarovatelný při 80-120 °C. Je složen ze slídového zesíleného papíru *Elmica® 4*, impregnovaný *silikonovým pojivem* a vyztužený *skelnou tkaninou* nebo *polyimidovým filmem*. Používá se pro izolační části elektrických strojů.

Druh materiálu	323	323 PI	325 T	325 PM
Tloušťky [mm]	0,25; 0,30; 0,35; 0,40; 0,45; 0,50			
Tolerance [mm]	+ - 0,04			
Obsah pojiva [%]	12 - 20	-	5 - 11	-
Obsah slídy, min. [%]	-	70	-	70
Elektrická pevnost,min. [kV/mm]	30	50	30	45
Teplotní třída	F		H	
Životnost při 20°C [měs.]	6			

Tab.4.6 Vlastnosti materiálů, převzato z [27]

- **Polyglas® H 200** - jedná se o *skelnou bandážovací pásku* pro bandážování kotev a rotorů, pro fixaci čel vinutí. Je složená z podélných *skelných vláken*, které jsou impregnovány kvalitní pryskyřicí ve stavu B. Páska je vhodná pro teplotní třídy 180 (H) a je odolná vůči vlhkosti, tedy ideální pro trakční motory.

Druh materiálu	H 200
Pevnost v tahu [kg/m ²]	200
Protažení při přetržení [%]	3
Smrštění polyesterové pryskyřice během tvrzení [%]	8
Tepelná odolnost trvale [°C]	155
krátkodobě [°C]	250
Doba vytvrzení při teplotě 155°C [hodin]	5
135°C [hodin]	12-15
Průrazné napětí [kV]	10

Tab.4.7 Vlastnosti materiálů, převzato z [27]

- **Skelná tkanice** - určená pod bandáž pro přichycení vinutí k izolačnímu kruhu. Je určena pro teplotní třídy 180 (H) a vyrábí se v rozmezí šířek 7-100 mm. Tloušťka tkanice je 0,10 / 0,15 / 0,20 / 0,25 / 0,40 mm.
- **Nomex®** - je syntetický materiál vyrobený z krátkých vláken a malých vláknitých částic *aromatického polyamidu-aramidu*. Aramidové částičky se zpracovávají do podoby papíru, který je zpevňován kalandrováním při vysokých teplotách.

Materiál	Nomex®
Elektrická pevnost E_p [kV/mm]	40
Relativní permitivita ϵ_r [-]	2,5
Měrný elektrický odpor ρ [$\Omega \cdot m$]	10^{16}

Tab.4.8 Vlastnosti materiálů, převzato z [8]

Dále má *Nomex®* vysokou pevnost v tahu, je odolný proti roztržení, je samozhášivý a nehořlavý. Je odolný proti účinkům chemikálií a rozpouštědel. Výhodou je, že dá dobře kombinovat s jinými materiály např. se slídou, slídovým papírem atd. Toho se využívá především při izolaci v elektrických strojích pro drážky rotorů i cívk.

- **Samica® flex** - složen ze slídového papíru *Samica®* / *skelné tkaniny* s nevytvrzeným *silikonovým elastomerem*. Používá se pro izolace flexibilních čel cívek před a po navinutí, na hlavní izolace trakčních cívek až do tepelné třídy C. Páska se vytvrzuje tepelným nahřátím.
- **Kife-A** - pevný lisovaný materiál složený ze slídového papíru *Elmica®4* a pojiva na bázi epoxidové nebo *silikonové pryskyřice* a je vyztužen vrstvou *skelné tkaniny*.

Materiál	KIFE	KIFE-A	KIFK
Tloušťka [mm]	0,40 – 1,50	0,70 – 1,50	0,40 – 1,50
Tolerance [mm]	+ - 0,02		
Elektrická pevnost, min při (15-35°C) 45-75% [kV/mm]	22	24	
Obsah pojiva, max. [%]	7,5	9,0	8,0
Slisovatelnost horkem, max. [%] Tloušťka 0,40 – 0,60 mm Tloušťka 0,70 – 1,50 mm	2 1	1	
Delaminace, max. [%]	1		
Teplotní třída	F		H
Životnost při (15 - 35°C) 45-75% [měs.]	6		

Tab.4.9 Vlastnosti materiálů, převzato z [27]

5. DEGRADAČNÍ ČINITELÉ

Vlastnosti izolačního systému nejsou dány pouze složením a strukturou samostatných izolačních materiálů, ale závisí především na působení degračních činitelů, kteří izolační systém znehodnocují. U každého činitele je důležité jakou dobu a jakou intenzitou na daný izolační systém působí. Znehodnocování je souhrn změn vlastností materiálu ke kterému dochází na základě fyzikálně chemických dějů v materiálu vlivem působení degračních činitelů.

Celá řada činitelů vyvolá trvalé znehodnocování materiálu, což je stav, kdy se vlastnosti materiálu nevrátí na původní úroveň. Mezi činitele řadíme dlouhodobé tepelné a elektrické namáhání, které se podílí na stárnutí izolace. Zestárlá izolace není schopna odolávat působící intenzitě elektrického pole a tím se stává velice náchylnou k průrazu.

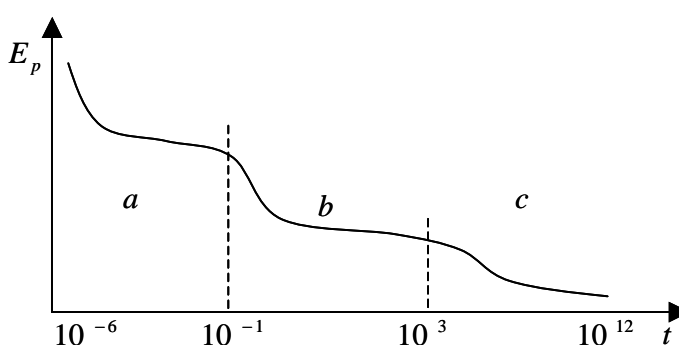
Dalšími výraznými činiteli podílejícími se na znehodnocování izolačních a elektrických vlastností jsou vlhkost vzduchu, prach a nečistoty. Působením vlhkosti se snižuje izolační odpor izolantu, klesá elektrická pevnost, dielektrické ztráty a permitivita se zvětšují, čímž se izolant opět zahřívá a dochází k teplotnímu znehodnocování a stárnutí nebo přímo v důsledku snížení izolačního odporu k elektrickému průrazu izolantu.

Jak je vidět, na znehodnocování izolačních vlastností se nepodílí pouze jeden činitel, nýbrž několik spolu svázaných, které vedou ve většině případů k průrazu a znehodnocení izolantu.

➤ U izolantu rozlišujeme tři typy průrazu:

- **Čistě elektrický** - velikost průrazného napětí nezávisí na teplotě ani na délce působícího napětí, je dána pouze velikostí energie pole v nejslabším místě izolantu, kde se prorazí.
- **Tepelný průraz** - je závislý na teplotě izolantu a délce působícího napětí, vzniká při velkých dielektrických ztrátách a nedostatečném ochlazení, projeví se prohořením místa.
- **Elektrochemický průraz** - je způsoben chemickými změnami v izolantu vlivem dlouhodobého působení teploty, tím izolant stárne.

a - Čistě elektrický průraz
b - Tepelný průraz
c - Elektrochemický průraz



Obr. 5.1 Průběh průrazných napětí v závislosti na čase, převzato z [22]

5.1 Teplotní namáhání

Mezi nejdůležitější degradační činitele působící v elektrickém stroji řadíme teplo, neboť ztráty vzniklé v elektrickém stroji se přeměňují na teplo a to působí na izolační systém. Krátkodobým působením teploty na izolační materiál se mění jeho rozměry, materiál křehne a mohou vznikat prasklinky, trhlinky nebo se mohou měnit některé jeho charakteristiky a vlastnosti. Dlouhodobé působení teploty má vliv na strukturu a vlastnosti izolace, kdy dochází k fyzikálně-chemickým dějům a následnému tepelnému stárnutí izolantů.

5.1.1 Tepelné stárnutí

Stárnutí izolantů je zapříčiněno nevratnými fyzikálně-chemickými ději, které jsou způsobeny oxidací, hydrolýzou (působení vodní páry), pyrolýzou (rozklad teplotou) i odpařováním nízkomolekulárních složek. Působení teploty na izolant a dobu života izolantů odvodil Montsinger.

$$t_{\delta} = t_0 \cdot e^{-b\Delta\delta} \quad ,\text{převzato z [18]}$$

Kde:

- t_{δ} - je život izolačního materiálu, který je vystaven teplotě δ [h]
- t_0 - je život při výchozí teplotě (20°C) [h]
- b - je konstanta pro daný materiál
- $\Delta\delta$ - je oteplení [K]

Tento vztah platí při nepřetržitém i při krátkodobém tepelném působení na izolační materiál. Podle tepelné odolnosti jsou zařazeny materiály do teplotních tříd, kdy tepelná třída definuje nejvyšší přípustnou teplotu ve stupních Celsia, pro kterou je elektroizolační materiál vhodný, neboť každé zvýšení teploty o 10° C způsobí pokles životnosti daného materiálu na polovinu. Život při výchozí teplotě se počítá asi na 7 let, 61000 hodin.

Upraveným Montsingerovým vztahem si můžeme ověřit životnost izolace při plném využití tepelné třídy 155 (F) a 180 (H). U tepelné třídy 155 (F) ověřím životnost izolace při tepelném využití na teplotní třídu 180 (H) a naopak u třídy 180 (H) využití na teplotní třídu 155 (F) což jsem navrhl pro trakční motor.

Vztah pro výpočet životnosti:

$$\ln t = \frac{B}{\delta + 273} + C \quad ,\text{převzato z [18]}$$

Kde:

- t - je doba života izolačního materiálu [h]
- δ - teplota v teplotní třídě [°C]
- B, C - materiálové konstanty

➤ **Životnost izolačního systému pro teplotní třídy 155 (F) 180 (H) při plném využití:**

$$\ln t_F = \frac{B}{\delta + 273} + C$$

Pro třídu 155 (F) ⇒

$$\ln t_F = \frac{13900}{155 + 273} - 22,57 = 9,9$$

$$t_E = 19930 \text{ hodin} \Rightarrow 2,3 \text{ roky}$$

$$\ln t_H = \frac{B}{\delta + 273} + C$$

Pro třídu 180 (H) ⇒

$$\ln t_F = \frac{15700}{180 + 273} - 24,75 = 9,9$$

$$t_E = 19930 \text{ hodin} \Rightarrow 2,3 \text{ roky}$$

Pokud je izolační systém využit plně ve své teplotní třídě, životnost jeho izolačního systému je asi 2,3 roky.

➤ **Životnost izolačního systému pro teplotní třídy 155 (F) využitou na třídu 180 (H):**

$$\ln t_{F(H)} = \frac{B}{\delta + 273} + C$$

$$\ln t_{F(H)} = \frac{13900}{180 + 273} - 24,75 = 5,9$$

$$t_{E(H)} = 3342 \text{ hodin} \Rightarrow 139 \text{ dnů}$$

Při zatěžování teplotní třídy 155 (F) na teplotní třídu 180 (H) je doba života izolačního systému jen 139 dnů, zde se potvrdilo, že při překročení teploty dané třídy se životnost izolačního systému snižuje.

➤ **Životnost izolačního systému pro teplotní třídy 180 (H) využitou na třídu 155 (F):**

$$\ln t_{H(F)} = \frac{B}{\delta + 273} + C$$

$$\ln t_{H(F)} = \frac{15700}{155 + 273} - 24,75 = 11,9$$

$$t_{H(F)} = 147266,6 \text{ hodin} \Rightarrow 17 \text{ let}$$

Při zatěžování teplotní třídy 180(H) jen na třídu 155 (F) je životnost izolace výrazná, až 17 let.

5.2 Elektrické namáhání

Spolu s tepelným namáháním je spojeno i elektrické namáhání izolace, neboť elektrické namáhání může způsobit ohřev izolantu, tím způsobuje tepelné stárnutí. Elektrické namáhání je zapříčiněno napětím, proudem a elektromagnetickým polem. Právě velikost stejnosměrného napětí zapříčiňuje vznik prostorového náboje a spolu s intenzitou elektrického pole jsou příčinou čistě elektrických i tepelných průrazů. Působením elektrického pole v dielektriku vznikají ztráty, které mohou být vodivostní, polarizační či následkem elektrických výbojů v dutinkách, to je příčinou elektrického stárnutí izolantu.

Jedním z vlivů působících na elektrické stárnutí izolantů jsou dielektrické ztráty následkem částečných výbojů v dutinkách izolantů, které jsou vyplněny plynem. Přítomností dutinek v izolantech se nelze i přes nejmodernější technologie vyhnout, dutinky vznikají i u vrstvených izolantů a je téměř nemožné vyrobit, aby byly zcela bez částečných výbojů. Výbojová činnost se uplatňuje např. v drážce rotoru, na povrchu izolace, v čelech nebo při výstupu z drážek v důsledku silového pole a přestoupení izolačních schopností materiálu, kdy izolace koroduje. Počet vzniklých částečných výbojů je dán velikostí přiloženého napětí. Urychlování elektrického stárnutí izolantu je zapříčiněno zvyšováním frekvence. V důsledku nově vyvinutých izolačních materiálů na bázi anorganických izolantů, slídy a porcelánu, se výbojová činnost neuplatňuje v plné míře, neboť jsou materiály velmi odolné.

5.2.1 Elektrochemický průraz

Elektrochemický průraz izolantu se uplatňuje nejvíce na izolaci, která je zestárlá vlivem elektrického či tepelného namáhání. V našem případě se nejvíce uplatňuje při tepelném stárnutí a při vzniklých elektrochemických procesech, které postupně zhoršují izolační vlastnosti i elektrickou pevnost. Elektrochemický průraz nepovažujeme za samostatný, protože vlastní mechanismus průrazu je nejčastěji realizován formou tepelného průrazu (viz obr. 5.2).



Obr. 5.2 Elektrochemický průraz zestárlé izolace budící cívky

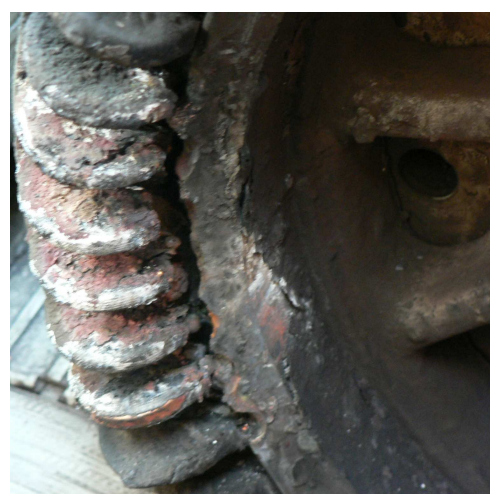
5.2.2 Tepelný průraz

Při tepelném průrazu se uplatňují Jouleovy ztráty i ohřev způsobený dielektrickými ztrátami. Jedná se o případ, kdy v izolantu vznikne tepelně elektrická nerovnováha a teplo, které se vyvíjí a převyšuje nad teplo odváděné do okolí. Ohřívání probíhá jen lokálně a neprobíhá v celém objemu izolantu. Pokud je dostatečně nízké přiváděné napětí, může růst teploty vést k nastavení rovnováhy mezi teplem vzniklým působením elektrického pole a teplem odvedeným do okolí. Pokud, ale výše přiváděného napětí nedovolí, aby došlo k ustálení rovnováhy, dochází k tepelné destrukci izolantu.

Elektrická pevnost při tepelném průrazu závisí na teplotě, frekvenci přiloženého napětí a na délce působení elektrického pole. Porušení izolantu tepelným průrazem se projevuje v místech, kde se teplo nejhůře odvádí, a jeho rozsah je ve větším objemu izolantu. Projevuje se uhelnatěním, tavením nebo prohoříváním izolace (viz obr. 5.3 a 5.4).



Obr. 5.3 Tepelný průraz v bandáži rotoru



Obr. 5.4 Tepelný průraz čel vinutí rotoru

5.2.3 Čistě elektrický průraz

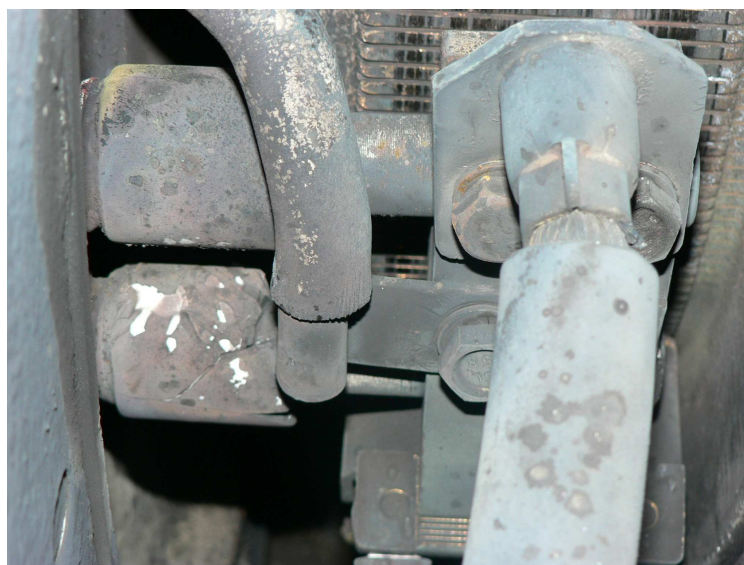
K čistě elektrickému průrazu dochází tehdy, kdy nemůže dojít k postupnému ohřevu izolantu a tím k procesu stárnutí. Příčinami čistě elektrických průrazů jsou právě volné elektrony, s nimiž souvisí elektrická vodivost izolantů. Elektrony se na vodivosti materiálu podílejí až při velmi vysokých teplotách nebo při působení silného elektrického pole, což se nazývá elektrickou vodivostí dielektrika. Při malé koncentraci volných elektronů dochází k průrazu následkem prudkého nárůstu počtu volných elektronů, kdy intenzita působícího elektrického pole dosáhne úrovně elektrické pevnosti. Tomuto nárůstu odpovídá velký nárůst proudu v izolantu, následné oteplení izolantu a porušení struktury roztavením.

Při velké koncentraci elektronů je rozhodující výměna energie mezi volnými elektrony v důsledku urychlování srážek elektrickým polem. Získaná energie je rovnoměrně rozložena mezi volné elektrony a pokud převládá výměna energie volných elektronů nad výměnou energie se strukturou izolantu, dochází k přehřátí izolantu a následnému průrazu. Čistě elektrický průraz se vyznačuje malým a koncentrovaným charakterem, projevuje se v místech, kde lze předpokládat největší deformace a nehomogenity elektrického pole.

5.3 Vlhkost a nečistoty

Vlhkost je jednou z nejzávažnějších forem znehodnocování elektrických vlastností izolanů ve formě snižování izolačního odporu, elektrické pevnosti a zvyšování dielektrických ztrát a permitivity. Při styku izolantu s vlhkým vzduchem se na povrchu vytvoří vrstvička molekul vody, která spolu s nečistotami přispívá výrazně k průrazům izolanů. Při vnitřním působení nastává pronikání vody do materiálu nazvaném absorpce, má za následek znehodnocování izolantu prostřednictvím zvyšování dielektrických ztrát a permitivity. Anorganické látky např. glazovaný porcelán, slída či epoxidové pryskyřice odolávají dobře vlhkosti a vodě, praktický význam má pouze snižování izolačního odporu spolu s nečistotami na povrchu izolantu.

Elektrická vodivost na povrchu izolantu je převážně iontového charakteru, závisí na vlhkosti okolního prostředí a na výskytu nečistot, které jsou schopné disociace. Již nepatrné množství nečistot stačí spolu s vlhkostí výrazně ovlivnit povrchovou vodivost izolantu. K elektrickému průrazu pak dochází v místě největšího elektrického namáhání a ve vadných místech izolantu, kde je porušen či znečištěn. Po přiložení napětí stoupá s elektrickou vodivostí i tepelná vodivost a vlhkost uložená v hlubší mikroskopické vrstvě izolantu není schopna vyprchat a způsobuje zvýšení intenzity iontového proudu. Dostoupí-li vzájemné působení zvětšující se elektrické vodivosti, teploty a přiloženého napětí určitých mezí, dochází k průrazu izolantu (viz obr. 5.5).



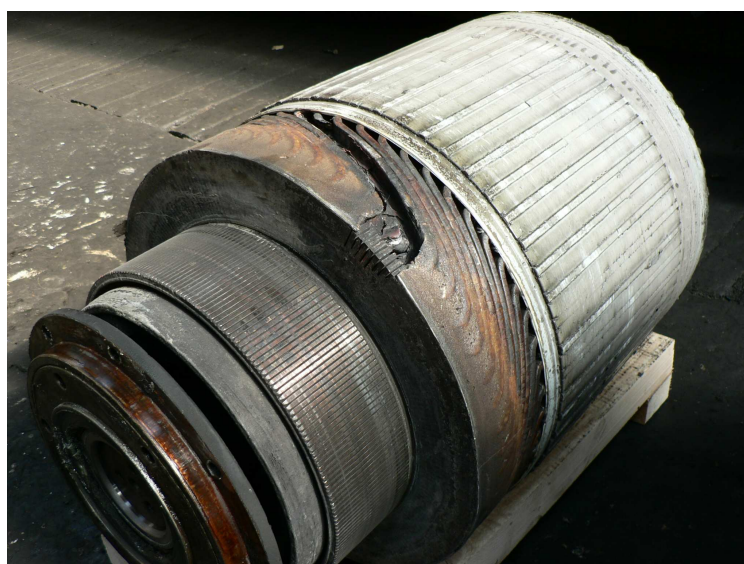
Obr. 5.5 Průraz izolátorů vlivem nečistot a vlhkosti

5.4 Mechanické namáhání

Izolace elektrického stroje musí kromě tepelného a elektrického namáhání odolávat také namáhání mechanickému, které je způsobováno vibracemi, rázy a odstředivými silami. Ztráta celistvosti izolace způsobená mechanickými vlivy zapříčiňuje následnou ztrátu elektrických vlastností. Tyto případy vznikají např. při zakládání vinutí do drážek, v provozu o odstředivé síly nebo dilatace způsobené změnou teploty vinutí, na celistvost izolace mají vliv mechanické rázy. Porušení celistvosti izolace se projevuje především na mezizávitové izolaci vinutí, která je postupným mechanickým znehodnocováním náchylná na výbojovou činnost v drážce, která způsobuje postupné stárnutí izolantu či mezizávitový zkrat rotorového vinutí (viz obr. 5.6).



Obr. 5.6 Poškození komutátoru mezizávitovým zkratem rotorového vinutí



Obr. 5.7 Propálená bandáž předního čela rotorového vinutí

5.4.1 Poruchy motoru zapříčiněné mezizávitovým zkratem rotorového vinutí

Vinutí kotvy je velmi namáhanou součástí motoru. Při otáčení kotvy motoru je vinutí neustále vytlačováno ven z drážek odstředivou silou, která je závislá na váze vinutí a rychlosti otáčení. Při nedostatečném upevnění cívek v drážkách se můžou cívky mezi sebou spojit a tak nastane závitový zkrat, kdy se přeruší vinutí kotvy (viz. obr. 5.7.) nebo se cívky jen zahřívají a v místě poškození se napaluje i komutátor (viz.obr. 5.6.).

Příčina poruchy	Následek poruchy
Závitový zkrat	Propálená bandáž předního čela rotorového vinutí
Závitový zkrat	Vyletované praporky
Závitový zkrat	Přepálené praporky
Závitový zkrat	Napálené lamely

Tab.5.1 Následky poruch mezizávitového zkratu , převzato z [8]

6. ZÁVĚR

Stejnoseměrné elektromotory jsou i přes postupné vytlačování a nahrazování modernějšími asynchronními motory díky svým výhodným trakčním vlastnostem a jednoduchosti regulace stále rozšířeny v dopravě. Je důležitá především provozní spolehlivost daná použitými izolačními materiály a tím i celým izolačním systémem. Izolační systém má dále vliv na výkon, zatěžování, ale i na předcházení poruchovosti motoru. Vlastnosti izolačního systému nejsou dány pouze strukturou izolačních materiálů a použitou technologií při zpracování, ale závisí na působení degračních činitelů, kteří izolační systém znehodnocují.

Proto jsem navrhl izolační systém, který se dobře hodí pro trakční motory a má výborné dielektrické vlastnosti ve všech požadovaných směrech (elektrická pevnost, ztrátový činitel, malá elektrická vodivost), tepelné i mechanické vlastnosti a výborná odolnost vůči stárnutí.

Neexistuje jediný izolační materiál, který by zajistil odolnost vůči všem působícím vlivům, proto se při konstrukci izolace elektrických strojů používá vždy kombinace několika materiálů a impregnačních technologií, které se vzájemně doplňují.

Vzhledem k současnému trendu používání *slídy*, *slídových výrobků* a technologií *resin-rich* nebo *VPI* pro vynikající dielektrické a mechanické vlastnosti bych volil kombinaci materiálů vhodných pro dané účely a materiály vhodné k již zmiňovaným technologiím např. *slídový papír*, v němž je obsažena *slída* ve formě malých částic a tím zachovává její základní vlastnosti, nese název *Samika®*, *Elmica®*.

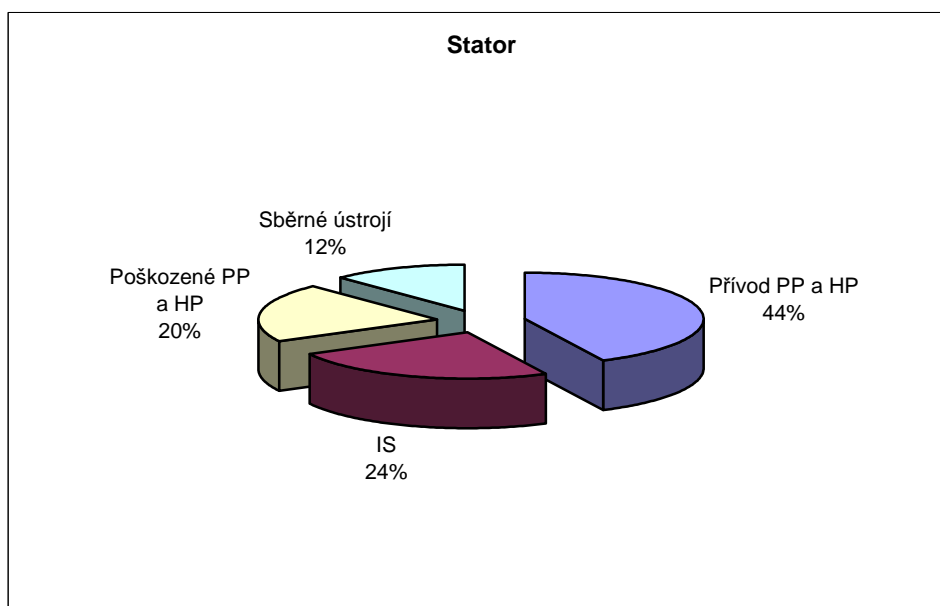
Působící degrační činitelé a mechanické namáhání se projevuje více na rotoru elektromotoru, proto jsem s pečlivostí vybíral materiály pro jednotlivé části - pro drážku, v ní umístěný vodič a také pro komutátor.

Mezi nejdůležitější degrační činitele řadíme ty, kteří vyvolávají trvalé znehodnocování materiálu vlivem tepelného či elektrického namáhání a způsobují stárnutí izolantů. Zestárlý izolant není schopen odolávat působící intenzitě elektrického pole a dochází u něj k elektrochemickému nebo tepelnému průrazu převážně v budících cívkách, pod bandáží čel rotorového vinutí, v čelech rotorového vinutí nebo v místech, kde není dostatečný odvod tepla.

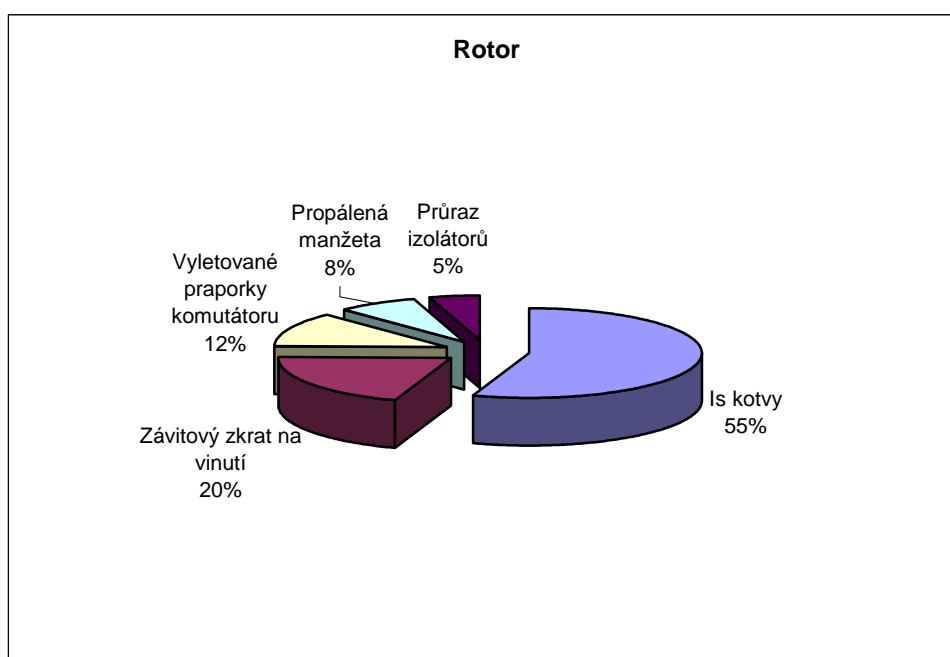
Dalšími činiteli jsou vlhkost a nečistoty působící na snižování povrchového izolačního odporu v důsledku převážně iontové elektrické vodivosti. K průrazu dochází v místě největšího elektrického namáhání, ve vadných a porušených místech izolantu. K průrazu vlivem znečištění dochází u izolátorů držáků kartáčů.

Neméně důležité je i mechanické namáhání způsobené vibracemi, rázy i odstředivými silami. Mechanické vlivy způsobují následnou ztrátu elektrických vlastností, porušení izolace cívek a mezizávitový zkrat. Závitový zkrat se projevuje přerušením vinutí kotvy v praporecích nebo velkým zahříváním a v poškozeném místě napalováním komutátoru.

Pro původní izolační systém stejnosměrného trakčního elektromotoru TE 005 E v teplotní třídě 155(F) jsem graficky vyjádřil nejčastější vyskytující se poruchy izolačního systému na statoru a na rotoru (viz. graf 6.1 a 6.2).



Graf 6.1 Poruchy izolačního systému statoru



Graf 6.2 Poruchy izolačního systému rotoru

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Bek, L. a kolektiv: Elektrické lokomotivy, vydání I., Nakladatelství dopravy a spojů, Praha, 1976
- [2] Keppert, S. : Elektrické stroje, 5. Stejnoseměrné stroje, II vydání, VŠB Ostrava, Ostrava, 1988
- [3] Chmelík, K.: Stejnoseměrné a komutátorové elektrické stroje, obecný stroj, I. vydání, VŠB- TUO, Ostrava, 2001
- [4] Konečná, E., Richter, A. : Elektrické stroje, učební texty, upravené vydání, TU Liberec, Liberec 2000
- [5] Pokorný, K.: Vinutí kotev stejnosměrných strojů, I vydání, rektorát VUT v Brně, Brno, 1967
- [6] Motorová lokomotiva T478.2, díl III. Elektrická výzbroj, ČKD PRAHA Závod Trakce, 1970
- [7] ČD V 25 – Příloha č.2 Instrukce pro zkoušení elektrických strojů točivých ŽKV závislé i nezávislé vozby, účinnost od 1.7.1997
- [8] Mentík, V.: Dielektrické prvky a systémy, I. vydání, BEN-Technická literatura, Praha 2006
- [9] Skotnica, J.: Měření na elektrotechnických materiálech pro kombinované a distanční studium, I. vydání, VŠB- TUO, Ostrava 2004
- [10] Dušánek, M. : Elektrotechnologie, Učební texty pro 2. ročník, pracovní verze, Trutnov duben 2005
- [11] Hrbáč, P., : Technologie a materiály elektrických strojů, učební texty, Ostrava 2005
- [12] ČSN EN 60505, Stručný výtah z normy, PŠIS-Nymburk, Nymburk duben 2006
- [13] ČSN EN 60085, Stručný výtah z normy, PŠIS-Nymburk, Nymburk duben 2006
- [14] Mentík, V. Pihera, J. Polanský, R. Prosr, P. Trnka, P.: Diagnostika elektrických zařízení, I. vydání, BEN-Technická literatura, Praha 2008
- [15] Zálíš, K.: Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů, I. vydání, Academia, Praha 2005
- [16] Kudláček, I.: Degradací procesy I, vydání první, Ediční středisko ČVUT, Praha 1994
- [17] Barták, A., Mravinač, L., Neumann, J., Vařák, J.: Diagnostika poruch izolací elektrických strojů, SNTL Praha, Praha 1984
- [18] Chmelík, K.: Degradací procesy elektrických a elektronických prvků a výrobků, učební texty, VŠB-TU Ostrava, Ostrava červen 2006
- [19] Pohl, J. : Bezdemontážní diagnostika DE LOKO, II. Doplněné vydání, ČKD PRAHA, 1982
- [20] Kvítek, E.: Materiály pro Elektrotechniku, učební texty, UPA, Pardubice 2007

- [21] Kučerová, E.: Elektrotechnické materiály, skripta, ZČU Plzeň, Plzeň 2002
- [22] Vavřínek, P.: Elektrické stroje a přístroje, Ostrava 2006, dostupný z www
< <http://www.sse-najizdarne.cz/projekt/es.pdf>. >
- [23] Kocman, S.: Stejnosměrné stroje, Ostrava, 2002, dostupný z www:
<<http://www.home.karneval.cz/0432866201/sss-skriptum.pdf>>
- [24] Kopecký, L.: Úvahy o činnosti elektrických strojů, 2005, dostupný z www:
<<http://www.free-energy.webpark.cz/teorie/elmot.pdf>. >
- [25] Elektroizolační materiály, dostupné z www: <<http://www.silent-czech.cz>>
- [26] Elektroizolační materiály, dostupné z www: <<http://www.cogebi.com>>
- [27] Elektroizolační materiály, dostupné z www: < <http://www.labara.cz/>>
- [28] Projektování elektrických zařízení, dostupné z www:
<<http://vyuka.fel.zcu.cz/kev/+SES1,2,-KOMBI/PEZ.pdf>>